

Digestion des protéines végétales chez les monogastriques. Exemple des protéines de pois

Irène Crévieu-Gabriel

▶ **To cite this version:**

Irène Crévieu-Gabriel. Digestion des protéines végétales chez les monogastriques. Exemple des protéines de pois. Productions Animales, 1999, 12 (2), pp.147-161. hal-02693979

HAL Id: hal-02693979
https://hal.inrae.fr/hal-02693979

Submitted on 1 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INRA Prod. Anim.,
1999, 12 (2), 147-161

I. CREVIEU-GABRIEL

INRA Station de Recherches Avicoles,
37380 Nouzilly

crevieu@tours.inra.fr

Digestion des protéines végétales chez les monogastriques. Exemple des protéines de pois

Réduire les rejets azotés des élevages nécessite de mieux maîtriser le rendement d'utilisation des protéines consommées par les animaux. Ce rendement résulte de l'efficacité de deux fonctions : la digestion des protéines et le métabolisme des acides aminés. Le rendement de la digestion varie beaucoup selon la matière première utilisée, mais aussi selon la variété pour une même matière première. Quels sont les facteurs intervenant dans cette variabilité ? Cet article détaille, pour le pois protéagineux, les différents facteurs limitant la digestion des protéines.

Résumé

Cet article présente les connaissances actuelles sur le déroulement de la digestion des protéines chez les monogastriques, essentiellement les porcs et les volailles. Le pois, qui est un protéagineux important en Europe, a été choisi comme exemple compte tenu des variabilités importantes de digestibilité des protéines qu'il présente. Après un rappel de la composition protéique de cette matière première et des digestibilités chez les monogastriques, les différents composants pouvant intervenir pour expliquer les résultats observés sont présentés. Ainsi plusieurs facteurs antinutritionnels contenus dans ce protéagineux peuvent avoir une influence négative. D'autres consituants du pois ou de l'aliment, tels que les glucides ou les lipides, peuvent aussi être impliqués. De plus, la structure même des protéines entraîne une sensibilité variable à l'hydrolyse. Ainsi certaines caractéristiques telles qu'une hydrophobie importante, une forte glycosylation, une structure secondaire riche en feuillets β, une structure tertiaire compacte et la présence de ponts disulfure semblent avoir une influence négative sur l'hydrolyse des protéines. Les traitements technologiques appliqués aux aliments peuvent aussi avoir dans certains cas un effet sur la digestion des protéines. Ainsi, le broyage peut dans certaines conditions améliorer la digestion. De même des traitements thermiques tels que la granulation ou l'extrusion, dans la mesure où les conditions utilisées ne sont pas extrêmes, peuvent améliorer la digestion des protéines.

Les quantités de rejets azotés issus de la digestion dépendent ainsi de nombreux facteurs. Ils sont constitués de protéines mais aussi de fortes proportions de peptides dont l'origine reste à déterminer (alimentaire et/ou endogène) pour proposer des solutions afin de les réduire.

Pour faire face à son déficit en protéines, l'union européenne, qui importe 70 % de sa consommation, cherche à développer des protéagineux comme le pois. Cette matière première est utilisée à 88 % en alimentation animale. La France est le principal producteur et utilisateur de ce protéagineux (48 % de la consommation européenne). Le pois est riche en protéines (18 à 30 %) et en lysine, et constitue un bon complément des céréales. Sa culture présente des avantages agronomiques (bon rendement) et une bonne image auprès des consommateurs du fait de son absence de besoin en engrais azotés. De plus l'utilisation de cette matière première dans les régimes pour porc et pour poulet conduit à de bonnes qualités organoleptiques des viandes. En France, le pois est couramment utilisé en alimentation animale, il représente 10 % des aliments pour les volailles et 20 % des aliments pour les porcs en croissance.

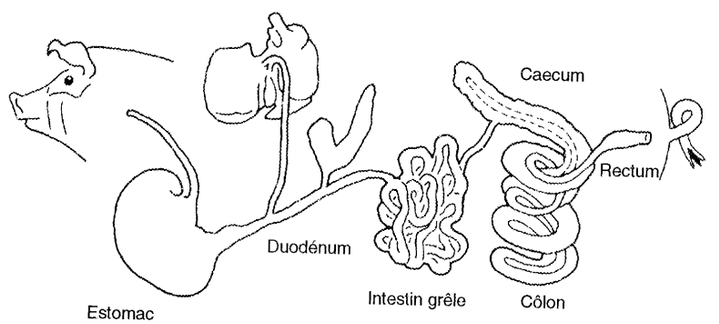
Cependant, l'incorporation massive de cette matière première dans l'aliment conduit parfois à des valeurs de digestibilité inférieures à celles des régimes à base de soja, ainsi qu'à de fortes variations de la digestibilité des protéines. Ainsi, la digestibilité fécale apparente varie entre 74 et 89 % chez le porc (Perez et Bourdon 1992) et entre 67 et 83 % chez le poulet (Carré et Conan 1989).

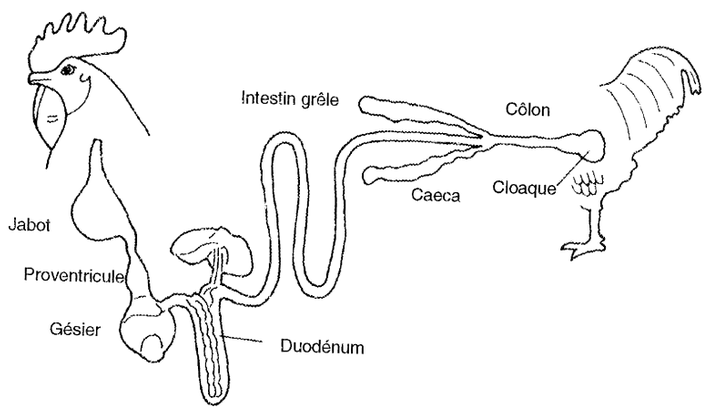
Plusieurs hypothèses sur l'origine de ces variations de digestibilités ont été émises par analogie avec d'autres légumineuses telles que le soja. En particulier les facteurs antinutritionnels, tels que les inhibiteurs trypsiques

ont été incriminés. Cependant, même s'ils peuvent être impliqués, ils ne sont pas les seuls responsables ; d'autres facteurs doivent intervenir. Le pois est donc un bon modèle d'étude de la digestion des protéines puisqu'il présente des digestibilités variables sans que l'on en connaisse l'origine.

Dans cet article, après avoir rappelé la composition des protéines de pois et leurs caractéristiques générales, nous présenterons les résultats de digestibilité des protéines obtenus chez différentes espèces animales monogastriques, essentiellement le poulet et le porc, puis les différents facteurs susceptibles

Rappels des mécanismes de digestion et d'absorption intestinales





Le déroulement de la digestion des protéines chez les monogastriques tels le porc et les oiseaux, suit les mêmes étapes. Cependant compte tenu des particularités anatomiques de ces deux espèces (voir figures), certaines différences apparaissent.

Digestion des protéines

Contrairement à l'estomac des mammifères monogastriques constitué d'une seule partie, celui des oiseaux comprend deux parties : d'abord le proventricule qui a un rôle chimique, puis le gésier qui a un rôle mécanique.

Dans l'estomac des mammifères ou le proventricule des oiseaux, de l'acide chlorhydrique est sécrété. Le contenu de cet organe a donc un pH faible, environ 2,5 chez le poulet, sans variation durant l'alimentation *ad libitum* de ces animaux, et 1,8 chez le porc à jeun, avec d'importantes variations au cours de la digestion (3 à 4 unités pH). Cette acidité entraîne une dénaturation des protéines et permet d'activiter les pepsinogènes qui sont sécrétés par ce même organe (l'estomac du porc ou le gésier du poulet). Les pepsines commencent alors l'hydrolyse des protéines. Les temps moyens de séjour des aliments dans l'estomac du porc sont plus importants (plus de trois heures) que dans le gésier des oiseaux (moins d'une heure). Chez ces deux espèces, les particules grossières ont des temps de séjour plus longs que les fines particules.

Les digesta arrivant dans l'intestin subissent l'action du suc pancréatique qui contient plusieurs protéases (endopeptidases : trypsine, chymotrypsine et élastase ; carboxypeptidases) ainsi que l'action des aminopeptidases et des dipeptidases intestinales. Contrairement aux mammifères qui ont un intestin grêle particulièrement long (18 m chez un porc adulte), celui des oiseaux est environ 10 fois plus court (1,6 m chez un poulet de 8 semaines). Cependant, le temps de séjour des digesta dans ce compartiment n'est que deux fois plus faible chez le poulet (environ une heure) par rapport au porc, ce qui peut s'expliquer par une vitesse de transit beaucoup plus faible dans l'intestin des oiseaux du fait de l'organisation particulière de leurs villosités intestinales. Par ailleurs, chez les oiseaux, des mouvements de reflux ont lieu entre le duodénum et le gésier.

Absorption des produits de l'hydrolyse le long du tube digestif

L'absorption a lieu principalement dans la partie supérieure de l'intestin grêle (jéjunum) aussi bien chez le poulet que chez le porc.

Les systèmes de transport des acides aminés varient selon leurs caractéristiques (charge, taille). Cependant la spécificité des transporteurs pour les différents acides aminés n'est pas stricte. Les acides aminés neutres hydrophiles de faible masse moléculaire sont transportés moins rapidement que les acides aminés hydrophobes de plus haute masse moléculaire, la vitesse de transport des acides aminés basiques étant intermédiaire. Il existe des compétitions entre les systèmes de transport des acides aminés et celui des oses résultant probablement d'une compétition pour la fourniture d'énergie.

Les produits de la digestion luminale des protéines peuvent être absorbés non seulement sous forme d'acides aminés mais aussi sous forme de di et tripeptides, aussi bien chez les mammifères que chez les oiseaux. Ce type de transport permet l'absorption des acides aminés de façon plus rapide que lorsqu'ils sont sous forme libre. La plupart de ces peptides sont hydrolysés par des enzymes cytoplasmiques. Cependant, des peptides intacts se retrouvent dans le sang portal. La proportion des acides aminés absorbés sous forme de peptides est mal connue. Elle varie selon les études et les espèces animales concernées, de 10 à 70 %.

Tous les produits non digérés dans l'intestin grêle passent dans le gros intestin où ils peuvent être soumis à l'action des microorganismes. Chez les mammifères, le côlon étant particulièrement bien développé, l'action microbienne est importante. Chez les oiseaux, seuls les digesta liquides ou extrêmement fins peuvent être l'objet d'une fermentation microbienne s'ils parviennent dans les caeca. Le reste des digesta est dirigé vers le côlon qui, du fait de sa très faible taille, a une capacité très limitée de fermentation.

d'expliquer les résultats observés ainsi que les voies futures à explorer pour réduire les pertes azotées d'origine digestive.

1 / Composition et digestibilité des protéines de pois

Les pois cultivés pour l'alimentation animale, sélectionnés pour leur richesse en protéines, sont appelés pois 'protéagineux'. Il s'agit de variétés de pois de type lisse. Cette matière première est constituée principalement d'amidon et contient 18 à 30 % de protéines de la matière sèche (Guéguen et Cerletti 1994).

1.1 / Composition des protéines de pois

Les protéines de pois sont caractérisées par une teneur élevée en lysine et une relative déficience en acides aminés soufrés et en thréonine par rapport aux besoins des animaux tels que le poulet et le porc (tableau 1). Elles sont constituées, comme toutes les protéines de légumineuses, de trois classes de protéines (figure 1) : les globulines, les albumines et les protéines dites 'insolubles'. Les deux premières fractions ont été initialement caractérisées par leur solubilité dans l'eau et en milieu salin respectivement.

a / Globulines

Les globulines représentent 50 à 65 % des protéines totales. Ce sont les principales protéines de réserve de la graine. Elles sont localisées dans les corps protéiques qui sont des organites cellulaires entourés d'une membrane (Wenzel *et al* 1993) et sont constituées de deux fractions principales caractérisées par leur coefficient de sédimentation en ultracentrifugation, 7S et 11S.

Viciline et conviciline (fraction 7S)

La viciline de pois, qui est majoritaire dans cette fraction, est une glycoprotéine contenant de 0,9 à 1,4 % de résidus osidiques. D'après Lawrence *et al* (1994) cette protéine aurait la même structure que la phaséoline, protéine 7S de haricot, c'est-à-dire une structure trimérique organisée selon un axe de symétrie de type trois. C'est un trimère de sous-unités de 50 kDa qui peuvent être identiques ou non, plus ou moins modifiées par des protéolyses post-traductionnelles et/ou des glycosylations. Ceci conduit à des polypeptides de masses moléculaires de 12,5 à 35 kDa. La composition en polypeptides de la viciline est donc complexe par rapport à celle de la fraction 7S d'autres légumineuses. Chaque sous-unité correspond au polypeptide initial de 50 kDa, les différents polypeptides issus des hydrolyses post-traductionnelles étant reliés entre eux par des liaisons non covalentes. La structure de cette protéine est stabilisée par des forces non covalentes.

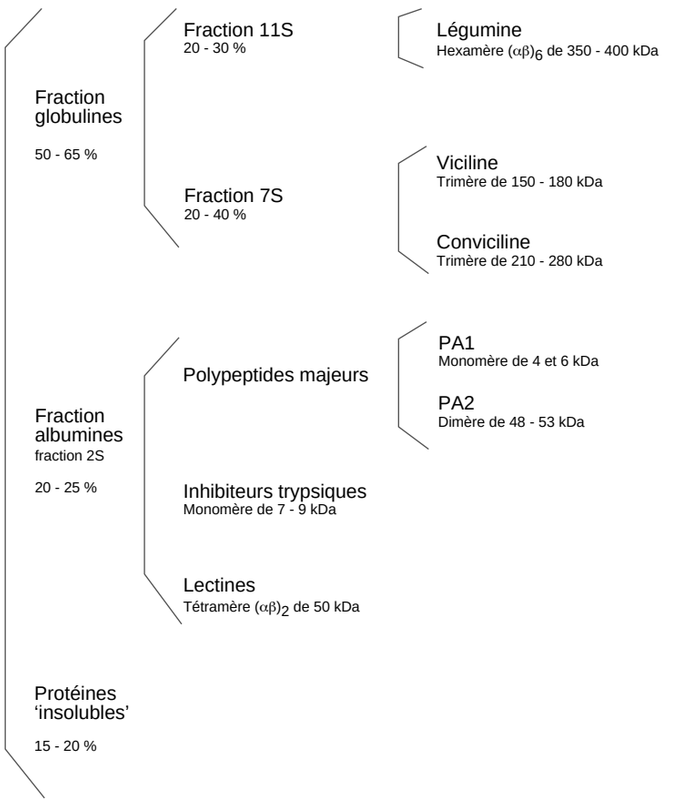
Les pois utilisés en alimentation animale contiennent de 18 à 30 % de protéines.

Tableau 1. *Composition en acides aminés essentiels (g/ 16 g d'azote) des protéines du pois et besoins du poulet et du porc.*

	Protéines du pois						Digestibles[4]		Protéine idéale[5]	
	Globulines[1]	Fraction 11S[1]	Fraction 7S[1]	Albumines[1]	Insolubles[2]	Pois[3]	Poulet	Porc	Poulet[6]	Porc[7]
LYS	6,4	5,0	7,6	9,3	7,7	7,4	7,8	7,9	6,6	6,5
MET	0,7	0,7	0,3	1,3	1,2	1,0	1,0	1,0	5,6[9]	2,0
CYS[8]	0,8	1,1	0,0	3,2	1,3	1,5	1,3	1,3		1,9
THR	3,3	3,4	2,5	5,7	4,7	3,8	3,8	3,7	4,6	4,2
TRP	0,6	0,7	0,0	1,5	1,1	0,8	0,8	0,8	1,2	1,2
LEU	8,2	7,8	8,8	4,9	8,6	7,2	7,5	7,4	8,3	6,5
VAL	4,7	4,5	4,4	4,4	5,8	5,0	4,9	4,8	5,2	4,4
ILE	4,6	4,3	4,8	3,9	5,3	4,5	4,6	4,4	4,8	3,9
PHE	5,4	4,6	5,9	4,5	5,6	4,8	5,0	4,9	8,7[11]	3,2
TYR[10]	3,4	3,2	3,0	4,7	4,2	3,4	3,5	3,4		3,0
HIS	2,6	2,7	2,0	2,6	2,4	2,4	2,5	2,6	2,6	2,1
ARG[12]	8,0	9,2	6,8	5,7	6,7	9,6	10,4	10,7	7,3	2,7

[1] D'après Gwiazda *et al* (1980).
[2] D'après Leterme *et al* (1990 b).
[3] D'après Mossé *et al* (1987) avec un taux de protéine (N x 6,25) de 25,25 %.
[4] Acides aminés digestibles exprimés pour 16 g d'azote digestible (d'après Rhone Poulenc 1993).
[5] La protéine idéale représente l'équilibre optimum des besoins en acides aminés.
[6] Leclercq (1996). Les besoins en acide aminés essentiels sont équivalents à 55 % des acides aminés totaux.
[7] Sève (1994). Les acides aminés essentiels représentent 45 % des acides aminés totaux.
[8] Étant synthétisée à partir de la méthionine, la cystéine n'est pas indispensable. Les recommandations alimentaires donnent les besoins en méthionine + cystéine.
[9] Besoin en méthionine + cystéine.
[10] La tyrosine n'est pas indispensable, car elle est synthétisée à partir de la phénylalanine. Bien que la tyrosine ne soit pas un précurseur de la phénylalanine, sa présence dans le régime réduit les besoins alimentaires en phénylalanine + tyrosine.
[11] Besoin en phénylalanine + tyrosine
[12] L'arginine est un acide aminé indispensable pour les oiseaux, du fait de l'absence du cycle de l'urée, mais pas chez les porcs sauf en période de croissance rapide.

Figure 1. *Classification des protéines de pois (d'après Guéguen et Cerletti 1994).*



L'autre protéine 7S, proche de la viciline, est appelée conviciline. Sa composition en acides aminés est voisine de celle de la viciline, mais, contrairement aux vicilines, elle contient des acides aminés soufrés. De plus elle n'est pas glycosylée. C'est une protéine de structure trimérique comme la viciline, mais dont les sous-unités ont une masse moléculaire de 68,2 kDa, qui ne subissent pas de protéolyse post-traductionnelle.

Légumine (fraction 11S)

Les légumines ou protéines 11S sont des hexamères de masse moléculaire comprise entre 350 et 400 kDa. Elles ne sont pas glycosylées. Chacune de ses six sous-unités est constituée d'un polypeptide acide α d'environ 40 kDa et d'un polypeptide basique β d'environ 20 kDa liés par un pont disulfure. Les sous-unités sont rassemblées dans l'hexamère en une structure compacte. Les polypeptides α, beaucoup moins hydrophobes que les polypeptides β, sont situés à l'extérieur de la molécule. La structure secondaire de la légumine est riche en feuillets β (Subirade *et al* 1994). D'après Lawrence et al (1994) les monomères de la protéine 11S (groupes $\alpha\beta$) auraient une structure similaire aux monomères de la protéine 7S. L'hexamère de la protéine 11S serait constitué de la superposition de deux trimères du type de la protéine 7S.

b / Albumines

Les albumines, appelées aussi fraction 2S d'après leur coefficient de sédimentation en ultracentrifugation, représentent 20 à 25 % des protéines totales. Elles sont riches en lysine et en acides aminés soufrés, particulièrement en méthionine (tableau 1). La fraction albumine est constituée de molécules ayant un rôle fonctionnel dans la graine (enzymes, défense de la plante). On distingue deux albumines majeures, appelées PA1 et PA2, et d'autres albumines présentes en quantités plus faibles, comme les inhibiteurs trypsiques et les lectines. L'albumine PA1 et les lectines sont localisées dans les corps protéiques (Higgins *et al* 1986, Wenzel *et al* 1993), alors que l'albumine PA2 et les inhibiteurs trypsiques sont localisés dans le cytoplasme (Mikola 1983, Gruen *et al* 1987).

Albumine PA1

L'albumine PA1, très riche en acides aminés soufrés, a une masse moléculaire de 11 kDa et contiendrait deux polypeptides de 6 kDa, suggérant une conformation dimérique. Mais cette fraction pourrait aussi être composée de deux protéines PA1a (6 kDa) et PA1b (4 kDa).

Albumine PA2

L'albumine PA2 comprend deux formes de protéines. Celle de masse moléculaire la plus élevée, 53 kDa, appelée PA2a, et celle de masse moléculaire plus faible, 48 kDa, appelée PA2b. La structure secondaire de ces protéines est riche en feuillets β (49 %). Ce sont des dimères de sous-unités de 26 kDa. Chaque sous-unité possède trois cystéines, dont deux sont liées par un pont disulfure, leur conférant une structure compacte. Leur rôle biologique n'est pas élucidé.

Inhibiteurs trypsiques

Les inhibiteurs trypsiques sont des peptides capables d'inhiber des protéases à sérine comme la trypsine et la chymotrypsine. Leur concentration est en général plus élevée dans les variétés de pois d'hiver (2,7-5,4 TIU/mg de MS) que dans celles de printemps (5,7-9,4 TIU/mg de MS). Ils ont des masses moléculaires de 7 à 8 kDa et contiennent sept ponts disulfure (Ferrason *et al* 1995).

Lectines

Les lectines de pois sont composées de deux isolectines de composition en acides aminés et masses moléculaires similaires (50 kDa) mais de points isoélectriques différents (5,9 et 7,0). Elles ne contiennent pas d'acides aminés soufrés. Leur glycosylation est peu importante (0,5 % de glucides). La structure secondaire des lectines n'a été étudiée précisément que chez la lentille ; elle montre une teneur élevée en feuillets β (Foriers *et al* 1981). Elles ont une structure tétramérique, avec deux polypeptides α de 5,7 kDa et deux polypeptides β de 17 kDa associés par des liaisons non covalentes.

c / Protéines insolubles

Les protéines insolubles, parfois appelées glutélines, représentent de 15 à 20 % des protéines de graines de pois. Leur composition polypeptidique est très similaire à celle des protéines solubles (Crévieu *et al* 1996), mais, du fait de leur insolubilité, elles sont peu étudiées.

Tableau 2. *Variabilité de la digestibilité des protéines de différentes variétés de pois chez le porc et le poulet.*

Animaux		Digestibilité	Composition des aliments		Référence
Espèce	Stade		Pois	Autre[1]	
Porc		Fécale apparente			
	Fin croiss.	70,8-89,9 %[2]	35 %	O	Hlödversson 1987
	Adulte	81,8-91,0 %[2]	40 %	B S	Leterme *et al* 1990 a
	Adulte	74,0-88,8 %[2]	40 %	C S	Perez et Bourdon 1992
	Adulte	77,8-90,3 %[2]	50 %	B S	Jondreville *et al* 1992
		Iléale apparente			
	Adulte	60,9-80,2 %[3]	65-75 %	Am	Jondreville *et al* 1992
	Adulte	60,1-68,5 %[3]	80 %	Am	Hess *et al* 1998
		Iléale réelle[4]			
	Adulte	72-38 %[2]	40 %	O	Buraczewska *et al* 1989
	Adulte	64,8-85,4 %[3]	70 %	Am, Sacc	Grosjean *et al* 1997
	Adulte	67,0-75,4 %[3]	80 %	Am	Hess *et al* 1998
Poulet		Fécale apparente			
	Jeune	67,8-81,8 %[2]	40 %	M S	Conan et Carré 1989
	Jeune	60,4-75,2 %[2]	50 %	M S	Igbasan et Guenter 1996

[1] Am : amidon de maïs, B : blé, C : céréales, M : maïs, O : orge, S : soja, Sacc : saccharose.
[2] Digestibilités des protéines du pois calculées par la méthode des différences.
[3] Le pois est le seul apport protéique.
[4] Les protéines endogènes sont déterminées chez des animaux recevant un régime protéiprive.

1.2 / Digestibilité des protéines du pois

Les études effectuées à l'INRA montrent une variabilité importante de la digestibilité fécale apparente des protéines aussi bien chez le porc (74-89 %, Perez et Bourdon 1992) que chez le poulet (68-82 %, Conan et Carré 1989). Ces résultats sont en accord avec ceux d'études françaises (78-90 %, Jondreville *et al* 1992), suédoises (71-90 %, Hlödversson 1987) et belges (82-91 %, Leterme *et al* 1990 a) effectuées chez le porc, ainsi que des études canadiennes effectuées chez le poulet (60-75 %, Igbasan et Guenter 1996) (tableau 2). Chez le porc, la digestibilité iléale apparente de l'azote présente aussi une variabilité importante (tableau 2). L'ignorance de l'origine de cette variabilité peut contribuer à limiter l'incorporation du pois dans les régimes.

Par ailleurs la digestibilité des protéines de pois est souvent inférieure à celle d'autres matières premières utilisées en alimentation animale. Ainsi, chez le porcelet, la digestibilité apparente des protéines de pois est inférieure à celle obtenue avec un régime témoin

La digestibilité des protéines de pois est très variable et souvent inférieure à celle d'autres matières premières.

Mesure de la digestibilité des protéines

Compte tenu des apports et des pertes de protéines le long du tube digestif, différentes digestibilités sont définies. La plus classiquement utilisée du fait de sa facilité de mesure est la digestibilité fécale apparente. Chez les oiseaux, cette mesure nécessite de séparer l'azote fécal de l'azote urinaire, du fait du mélange des voies fécale et urinaire au niveau du cloaque. Si l'on ne veut pas tenir compte des protéines endogènes (mucus, cellules desquamées, enzymes) dans les excréta, il faut les quantifier. Le plus souvent cette quantification est effectuée chez des animaux à jeun ou recevant un régime sans protéines. D'autres méthodes peuvent être utilisées telles que l'analyse de régression avec des quantités croissantes de protéines dans l'aliment, une alimentation peptidique suivie de l'ultrafiltration des contenus digestifs. Ceci permet de mesurer les pertes endogènes basales. La digestibilité mesurée est alors dite 'vraie' ou 'standardisée'. Cependant si l'on veut quantifier les pertes endogènes spécifiques dues à l'aliment, il est nécessaire d'utiliser d'autres techniques telles que le marquage de l'aliment ou de l'animal. La digestibilité est alors dite 'réelle'.

L'azote microbien n'étant pas utilisé par l'animal, il est plus intéressant de connaître la digestibilité en fin d'iléon, qui peut être, comme la digestibilité fécale, 'apparente', 'vraie' ou 'réelle'. Dans le cas des porcs, les mesures de digestibilité iléale sont courantes. On utilise des canules de différents types, simples ou ré-entrantes, ou une anastomose iléo-rectale. Chez les oiseaux, les canules sont peu utilisées pour des raisons pratiques. On peut effectuer une ablation des caeca ou prélever les contenus iléaux après abattage des animaux. En pratique, la plupart des études effectuées chez les oiseaux sont pratiquées sur des animaux conventionnels car la microflore est considérée comme beaucoup moins importante que chez les porcs.

à base de caséine et de farine de poisson (Bertrand *et al* 1988, Le Guen *et al* 1995). Chez le veau, le remplacement d'une partie des protéines de lait par du pois entraîne une baisse importante de la digestibilité iléale (Bush *et al* 1992). Chez le poulet, l'inclusion de 50 % de pois dans un régime maïs/soja entraîne une baisse de digestibilité fécale apparente (Igbasan et Guenter 1996).

De plus, le pois est caractérisé par une faible digestibilité des acides aminés soufrés chez le coq (Igbasan et Guenter 1997) et de la cystéine et du tryptophane chez le porc (Mariscal-Landin 1992, Grosjean *et al* 1997). Or, la comparaison à la 'protéine idéale' montre que ces acides aminés sont limitants dans le pois (cf tableau 1).

2 / Facteurs intervenant dans la digestion des protéines

La variabilité des coefficients de digestibilité des protéines entre les différentes études peut avoir des causes méthodologiques concernant, par exemple, les taux d'incorporation du pois dans l'aliment, les méthodes de détermination des digestibilités vraies, les mesures effectuées au niveau iléal ou fécal, l'âge de l'animal et l'espèce considérée. Cependant, en plus de ces problèmes méthodologiques, de nombreux facteurs peuvent influencer la digestibilité des protéines. Les variations peuvent être dues aussi bien au degré d'hydrolyse des protéines alimentaires qu'aux différences de pertes endogènes spécifiques comme cela a été observé chez le veau (Bush *et al* 1992) et le porc (Hess *et al* 1998). Par analogie avec des graines de légumineuses très étudiées telles que le soja et le haricot, on a souvent accusé les facteurs antinutritionnels tels que les inhibiteurs trypsiques, les lectines et les tannins d'être responsables des faibles digestibilités observées avec certaines variétés de pois. Mais d'autres constituants de la ration, tels que certains glucides, les lipides ajoutés à la ration et la structure de certaines protéines pourraient aussi intervenir (figure 2).

Les différents constituants du pois et de la ration peuvent entraîner des modifications de digestibilité des protéines.

Figure 2. *Facteurs affectant la digestibilité fécale apparente des protéines.*

Aliment	Animal
- structure des protéines	- vitesse de transit
- facteurs antinutritionnels (tannins, phytates, lectines, inhibiteurs trypsiques)	- activités enzymatiques
- lipides (quantité et composition)	- absorption (peptides, acides aminés)
- polysaccharides non amylacés hydrosolubles (viscosité) α-galactosides (sucres non hydrolysables par l'hôte : multiplication bactérienne)	- protéines endogènes
- accessibilité (granulométrie) (polysaccharides non amylacés hydro-insolubles (parois végétales) : limitation de l'accessibilité enzyme / substrat)	

2.1 / Effet des composants de l'aliment sur la digestion des protéines

a / Facteurs anti-nutritionnels

Les facteurs antinutritionnels sont supposés protéger la graine contre les champignons, bactéries, insectes, mais ils ont aussi un effet négatif chez les animaux d'élevage.

Tannins

Les tannins sont des composés polyphénoliques qui se subdivisent en deux groupes : les tannins hydrolysables et les tannins condensés. Ce sont ces derniers que l'on trouve dans les graines de céréales et de légumineuses, principalement localisés dans les téguments des graines. Leurs effets biologiques sont dus à leur capacité à se complexer avec les protéines alimentaires et/ou les enzymes. Ils sont ainsi responsables de baisses de digestibilité des protéines chez les oiseaux (Longstaff et McNab 1991) et les porcs (Perez et Bourdon 1992). Les tannins sont aussi responsables d'une augmentation des pertes de protéines endogènes en augmentant les sécrétions d'enzymes digestives (Jansman *et al* 1993) et de mucus (Sell *et al* 1985) et le renouvellement cellulaire de la muqueuse intestinale (Vallet *et al* 1994).

Cependant, la plupart des variétés de pois produites en Europe appartiennent à la sous-espèce hortense (fleurs blanches) c'est-à-dire sans tannin.

Phytates

Les phytates, qui constituent la forme de réserve du phosphore de la plante, représentent de 0,5 à 3,4 % de la matière sèche des principales matières premières végétales utilisées en alimentation animale, le pois ayant des teneurs particulièrement faibles (de 0,5 à 0,6 %, Pointillart 1994). Ils ont des propriétés chélatantes et forment des complexes avec les minéraux, mais aussi avec les protéines. Ces interactions dépendraient du pH (De Rham et Jost 1979) : à pH faible, les liaisons s'effectuent entre l'acide phytique, chargé de façon fortement négative, et les protéines chargées positivement ; à pH élevé, les protéines et les phytates sont chargés négativement et des cations multivalents tel que le calcium interviendraient dans la formation des complexes protéines-phytates. Cependant l'association des protéines avec les phytates dépend de l'accessibilité des acides aminés chargés (O'Dell et de Boland 1976). Les protéines alimentaires, ainsi que les enzymes, peuvent entrer dans la formation de ces complexes. Ainsi les phytates ont un effet sur la protéolyse *in vitro*, cet effet pouvant être inhibiteur (Knuckles et al 1989) ou activateur (Deshpande et Damodaran 1989 b). Mais, *in vivo*, aucun effet n'est observé sur la digestibilité des protéines (Knuckles *et al* 1989). L'addition de phytases microbiennes au régime a un effet variable sur la digestibilité selon les études. Chez le porc, alors que Mroz *et al* (1994) observent une amélioration de la digestibilité, Li *et al* (1998) n'observent aucun

effet. Chez les oiseaux, les résultats sont surprenants dans la mesure où l'on observe une amélioration de la digestibilité de la plupart des acides aminés chez la poule et la dinde, mais pas chez le coq (Sebastian *et al* 1998). Aucun travail n'a été effectué chez le dindon. Des études ultérieures sont donc nécessaires pour expliquer cette variabilité de réponse.

Lectines

En se fixant sur la muqueuse intestinale, les lectines pourraient avoir différents effets antinutritionnels : diminuer l'absorption, favoriser la prolifération des cellules intestinales, augmenter la sécrétion de mucines, donc augmenter les pertes endogènes, perturber la perméabilité intestinale, modifier l'écologie bactérienne en s'attachant aux sites de fixation des bactéries (Pusztai *et al* 1993).

L'effet des lectines est de nature et d'intensité variables selon leur origine botanique. La différence de toxicité des différentes lectines serait due à leur spécificité de liaison aux oligosaccharides du glycocalyx des cellules épithéliales de la muqueuse intestinale (Huisman et Jansman 1991). Les lectines de soja et de haricot ont une affinité pour la N-acétylgalactosamine et le galactose, qui sont présents dans le glycocalyx des cellules matures de la partie supérieure des villosités intestinales, donc pourraient modifier la fonctionnalité de ces cellules. De leur côté, les lectines de pois et de féverole, ont une affinité pour le D-mannose ou le D-glucose. Ces oligosaccharides sont présents dans le glycocalyx des cellules les moins matures, telles que celles présentes dans la partie inférieure des villosités intestinales, donc ces lectines auraient peu d'effet sur la digestion. Dans le cas des lectines de pois, bien qu'elles soient peu sensibles à l'hydrolyse le long du tube digestif (Pusztai *et al* 1993), et donc présentes jusqu'à la fin de l'intestin grêle, aucun effet n'a été démontré. Chez le porcelet, Bertrand *et al* (1988) attribuent l'absence d'effet à la neutralisation des lectines encore actives par les nombreux glycoconjugués présents dans l'aliment et par les sécrétions intestinales lors de la digestion.

Inhibiteurs trypsiques

Les inhibiteurs trypsiques sont les facteurs antinutritionnels les plus étudiés, en particulier chez le soja où ils sont présents en quantité particulièrement importante et ont un effet négatif sur la digestion des protéines. Ils agissent par la formation de complexes enzyme-inhibiteur irréversibles inactivant les enzymes (Huisman et Jansman 1991). Il en résulte une hypertrophie du pancréas et une hypersécrétion des enzymes pancréatiques chez les petits animaux tels que la souris, le rat, le cobaye et le poulet. Cette hypersécrétion d'enzymes représente donc une perte de protéines endogènes et par conséquent une baisse de la digestibilité apparente. Chez les animaux de plus grande taille tels que le porc et le veau, mais aussi chez certains animaux de petite taille tel que le cochon d'Inde, on n'observe pas d'hypertrophie du pancréas.

Dans le cas du pois, l'effet des inhibiteurs trypsiques sur la digestibilité des protéines est controversé. Ils expliqueraient une partie plus ou moins importante des baisses de digestibilité observées avec certaines variétés aussi bien au niveau fécal (Leterme *et al* 1990a, Perez et Bourdon 1992) qu'iléal (Jondreville *et al* 1992) chez le porc et le porcelet (digestibilité iléale : Le Guen *et al* 1995). On constate en effet que pour les variétés d'hiver, plus riches en inhibiteurs trypsiques, la digestibilité des protéines est plus faible que pour les variétés de printemps (Carré *et al* 1991, Jondreville *et al* 1992, Perez et Bourdon 1992). Mais aucune corrélation n'apparaît entre la teneur en inhibiteurs trypsiques et la digestibilité des protéines, aussi bien chez le porc (Perez et Bourdon 1992) que chez le poulet (Carré et Conan 1989). Cependant une étude effectuée chez le porcelet (Le Guen *et al* 1995), utilisant des extraits acides de protéines de pois, très concentrés en facteurs antinutritionnels (lectines, inhibiteurs trypsiques), a montré que les inhibiteurs trypsiques de pois ont un effet négatif sur la digestibilité iléale des protéines, les lectines de pois étant considérées comme inoffensives chez cette espèce animale (Bertrand *et al* 1988). Une interaction entre les lectines et les inhibiteurs trypsiques pourrait aussi être à l'origine de l'effet négatif observé. L'effet de ce facteur reste donc à éclaircir.

Parmi l'ensemble de ces facteurs antinutritionnels, seuls les inhibiteurs trypsiques pourraient être présents en quantité suffisante dans le pois pour modifier la digestibilité des protéines.

b / Glucides

Les glucides représentent l'essentiel des constituants des régimes utilisés en alimentation animale. On peut les classer en trois groupes : l'amidon, les polysaccharides non amylacés (PNA) et les sucres.

Darcy *et al* (1981) ont montré que la nature de l'amidon a une influence sur la digestibilité iléale apparente des protéines. Ainsi, chez le porcelet, le remplacement de l'amidon de maïs par de l'amidon de pois entraîne une baisse de la digestibilité iléale apparente des protéines (Everts *et al* 1996).

Les PNA peuvent être subdivisés en hydrosolubles et hydro-insolubles. Les PNA hydrosolubles, tels que les gommes de guar et les pectines, du fait de la viscosité qu'ils génèrent, pourraient réduire les vitesses de diffusion des enzymes ou des produits de la digestion des protéines, et donc diminuer l'hydrolyse ou l'absorption chez l'animal. Ainsi, l'ajout d'enzymes hydrolysant les PNA (β-glucanases) dans un régime à base d'orge entraîne une augmentation de la digestibilité iléale de la plupart des acides aminés chez le porc (Torralardona *et al* 1997) et de la digestibilité des protéines chez le poulet (Almirall *et al* 1993). Cependant les viscosités observées in vitro pour le pois étant particulièrement faibles (Carré *et al* 1994), de tels effets ne peuvent être invoqués pour cette matière première. Les parois cellulaires, constituées pour

l'essentiel de PNA hydro-insolubles, peuvent diminuer l'accessibilité des enzymes aux aliments par encapsulation physique des protéines (Saunders *et al* 1969), augmenter les pertes de protéines endogènes (Siriwan *et al* 1989, Mariscal-Landin *et al* 1995), et accroître les synthèses microbiennes (Parsons *et al* 1983, Mason 1984). Ainsi la présence de PNA hydro-insolubles dans les aliments entraîne souvent une baisse de digestibilité fécale chez le porc. Chez les oiseaux, les variations de digestibilité observées ne sont généralement pas significatives (Longstaff et McNab 1991), bien qu'une diminution soit observée dans la plupart des cas. Les différences de résultats obtenues entre les mammifères et les oiseaux pourraient être dues en partie à une différence anatomique de leur tube digestif. En effet, contrairement aux mammifères, les oiseaux ont des capacités fermentaires beaucoup moins importantes puisque celles-ci ne peuvent avoir lieu que dans les caeca dans lesquels ne rentrent que les particules fines, leur côlon étant de taille très réduite. L'action des microorganismes sur les PNA est donc beaucoup moins importante chez les oiseaux que chez les mammifères.

Parmi les sucres, on trouve des α-galactosides, qui représentent 5 % de la matière sèche des graines de pois (Carré *et al* 1984). Par manque d'α-galactosidase dans la muqueuse intestinale, ils ne sont pas hydrolysés par l'animal. Ils se concentrent donc dans le tube digestif ce qui peut entraîner une rétention d'eau dans la lumière intestinale et une augmentation du débit des digesta, ce qui pourrait limiter la digestion des aliments, ou entraîner des diarrhées. Cependant Trevino *et al* (1990) n'ont pas observé d'effet négatif de ces glucides chez le poulet en croissance.

En résumé, il semble que, contrairement à d'autres matières premières, les glucides du pois ne modifient pas la digestibilité iléale des protéines, comme le montre l'absence d'effet chez le porcelet de l'ajout de glucides de pois purifiés à des isolats de protéines de pois (Huisman et Le Guen 1991).

c / Lipides

L'augmentation du niveau d'incorporation de lipides (huile de colza) dans l'aliment entraîne une augmentation de la digestibilité iléale des protéines chez le porc, mais n'a pas d'effet sur la digestibilité fécale (Imbeah et Sauer 1991). Chez le coq, une farine animale riche en lipides présente une meilleure digestibilité fécale des protéines qu'une farine moins riche en lipides (Lessire *et al* 1985). De même, la digestibilité iléale des protéines de maïs est plus élevée chez le coq dans le cas de variétés enrichies en lipides comparativement aux variétés courantes (Parsons *et al* 1998). L'amélioration de la digestibilité des protéines suite à l'enrichissement en lipides de la ration pourrait être due au ralentissement du transit digestif (Martinez *et al* 1995, Lin *et al* 1997). Cet effet pourrait s'expliquer par la stimulation de la CCK-PZ car celle-ci inhibe la motricité gastro-intestinale (Martin *et al* 1998). Les lipides pourraient aussi agir par l'intermédiaire de la neurotensine (Degolier *et al* 1997) qui diminue la fréquence et l'intensité des contractions gastro-intestinales. Cependant, dans les études utilisant des matières premières plus ou moins riches en lipides (Lessire *et al* 1985, Parsons *et al* 1998), d'autres facteurs comme le type de protéines présentes dans ces matières premières pourraient intervenir. La nature des lipides pourrait aussi jouer un rôle, comme le montre l'amélioration de la digestibilité des protéines chez le poulet lorsque les régimes sont riches en acides gras insaturés au lieu d'acides gras saturés (Kussaibati *et al* 1983).

2.2 / Effet de la structure des protéines sur leur hydrolyse

Plusieurs études *in vitro* ont mis en évidence l'influence de la structure des protéines sur leur hydrolyse (Deshpande et Damodaran 1989a, Oria *et al* 1995, Perrot 1995). Seules quelques études ont été réalisées dans les contenus digestifs de monogastriques.

Concernant le pois, les données de la littérature montrent des sensibilités à l'hydrolyse qui varient selon les types protéiques, sensibilité que l'on peut relier aux caractéristiques structurales des protéines concernées (tableau 3).

a / Globulines

Peu d'études ont été effectuées sur la viciline de pois par rapport aux nombreuses études sur la phaséoline, protéine 7S du haricot. Bien que les séquences en acides aminés des protéines 7S de plusieurs légumineuses soient très proches (Wright 1987) et que leur structure générale soit semblable (Lawrence *et al* 1994), les quelques différences qu'elles présentent peuvent modifier localement leur structure et donc leur sensibilité à l'hydrolyse enzymatique. Contrairement à la phaséoline, qui présente une grande résistance à l'hydrolyse *in vitro* (Deshpande et Damodaran 1989a) et *in vivo* (Begbie et Ross 1993), la viciline est bien hydrolysée comme le montrent plusieurs études *in vitro* avec la pepsine et/ou la trypsine (Nielsen *et al* 1988, Deshpande et Damodaran 1989a, Perrot 1995), et *in vivo* chez le rat (Aubry et Boucrot 1986), le veau (Lallès *et al* 1996) et le poulet (Crévieu *et al* 1997a). La résistance de la phaséoline à l'hydrolyse comparativement à la viciline de pois pourrait être due à plusieurs facteurs : sa structure compacte (Chang et Saterlee 1981) et rigide (Deshpande et Damodaran 1989a), la présence de ponts disulfure (Sathe *et al* 1984) qui n'existent pas dans la viciline (Gwiazda *et al* 1980), la plus forte glycosylation (phaséoline : 4,46 %, Pusztai et Watt 1970 ; viciline : 0,93-1,37 %, Davey et Dudman 1979), une structure secondaire plus riche en feuillets β (phaséoline : 50 %, viciline : 30 % ; Deshpande et Damodaran 1989a), une plus faible hydrophilie (Nielsen *et al* 1988), l'absence de clivage des sous-unités. L'autre protéine 7S du pois, la conviciline, n'a été l'objet que de deux études, une *in vitro* (Perrot 1995) et une chez le poulet (Crévieu *et al* 1997a) qui ont montré qu'elle est facilement hydrolysée.

Tableau 3. *Sensibilité à l'hydrolyse des différentes protéines de pois et relations avec leurs caractéristiques structurales.*

Protéines	Sensibilité à l'hydrolyse	Caractéristiques structurales
Globulines		
Viciline	+	Protéolyse post-traductionnelle Non glycosylée Pas de ponts disulfure Structure II pauvre en feuillets β (30 %) Structure II riche en coudes β (27,5 %)
Légumine		
Polypeptides α	+	Localisée en surface de la protéine
Polypeptides β	-	Localisée à l'intérieur de la protéine Hydrophobie importante Structure III très ordonnée
Albumines		
PA1	-	Ponts disulfure
PA2	-	Hydrophobie importante Structure II riche en feuillets β (49 %) Un pont disulfure intramoléculaire Structure III compacte
Lectines	-	Hydrophobie importante Structure II riche en feuillets β (48 %) Serait stabilisée par ses ligands
Inhibiteurs trypsiques	-	Sept ponts disulfure

Les études d'hydrolyse des protéines 11S de différentes légumineuses montrent un comportement différent entre les polypeptides acides et basiques. *In vivo*, chez le poulet (Crévieu *et al* 1997a) et le veau (Lallès *et al* 1996), alors que les polypeptides acides sont bien hydrolysés, une partie des polypeptides basiques persiste. L'hydrolyse des polypeptides acides α peut s'expliquer par leur position en surface de la légumine d'où leur plus grande exposition aux enzymes. La résistance des polypeptides basiques à l'hydrolyse enzymatique, pourrait s'expliquer par leur localisation interne dans la légumine, leur structure très ordonnée (Subirade *et al* 1994) et leur hydrophobie importante.

Cependant, malgré la persistance de certains polypeptides de légumine en fin d'intestin grêle, la fraction globuline présente une digestibilité fécale apparente élevée (87 %), supérieure à celle de l'ensemble des protéines de pois (78 %) (Crévieu *et al* 1997a). Les globulines, protéines majeures du pois, malgré leur structure oligomérique compacte et leur faible solubilité qui peuvent sembler peu favorables aux contacts avec les enzymes, ne peuvent donc pas être considérées comme les seules responsables des faibles digestibilités des protéines de certaines variétés de pois.

Chez les jeunes mammifères, certaines globulines de pois ou d'autres légumineuses augmenteraient la perméabilité intestinale aux protéines alimentaires, induisant une réponse immunitaire locale conduisant à des désordres digestifs, notamment des diarrhées et des baisses de l'ingestion (Le Guen *et al* 1991, Bush *et al* 1992, Lallès et Toullec 1996). A notre connaissance, chez les oiseaux, aucune étude sur la perméabilité intestinale aux protéines n'est présente dans la littérature.

b / Albumines

L'hydrolyse de l'un des polypeptides majeurs, l'albumine PA1, a été très peu étudiée. Une étude effectuée *in sacco* chez le ruminant a montré une résistance à l'hydrolyse, attribuée à sa teneur en ponts disulfure (Hancock *et al* 1994). Cependant, on peut remarquer que cette protéine est tout de même hydrolysée durant la germination (Schroeder 1984).

Peu d'études ont concerné l'hydrolyse de l'albumine PA2. Alors qu'une hydrolyse *in vitro*, en présence de pepsine porcine, à pH 2, entraîne la disparition de l'albumine PA2 au bout de 15 minutes seulement (Perrot 1995), la présence de cette protéine est détectée dans le gésier du poulet (Crévieu *et al* 1997a). La PA2 parvient donc dans l'intestin du poulet où elle subit l'action de différentes protéases. Mais cette hydrolyse s'avère difficile comme le montrent les résultats d'hydolyse *in vitro* par la trypsine (Gruen *et al* 1987, Perrot 1995) ainsi que la détection de cette protéine en fin de tube digestif du poulet (Crévieu *et al* 1997a). La relative résistance à l'hydrolyse de la PA2 pourrait être due à la présence de trois cystéines, dont deux forment un pont intramoléculaire, conférant ainsi à cette protéine une structure compacte globulaire (Gruen *et al* 1987). De plus, la teneur élevée en feuillets β de l'albumine PA2 (49 %), ainsi que son hydrophobie élevée pourraient intervenir dans sa faible sensibilité à l'hydrolyse. La résistance à l'hydrolyse de cette protéine,

Certaines caractéristiques structurales des protéines telles que la glycosylation, les ponts disulfure, une structure compacte, peuvent avoir un effet négatif sur leur hydrolyse.

Tableau 4. *Caractéristiques structurales des protéines pouvant avoir un effet négatif sur leur hydrolyse.*

Caractéristiques structurales	Exemples de protéines
Glycosylation	Phaséoline Conglutine γ du lupin Mucines
Hydrophobie	Polypeptides β de légumines Albumine PA2 du pois Lectines
Structure secondaire riche en feuillets β	Phaséoline Légumine de pois Albumine PA2 Lectines
Ponts disulfure	Prolamines de céréales Légumines Phaséoline Albumines PA1 et PA2 du pois Inhibiteurs trypsiques
Structure tertiaire compacte	Phaséoline Polypeptides β de légumines Albumine PA2
Localisation spatiale	Polypeptides β de légumines (intérieur de la protéine)

riche en cystéine (Schroeder 1984), pourrait expliquer en partie la faible digestibilité de cet acide aminé chez le porc (Mariscal-Landin 1992, Grosjean *et al* 1997) et le coq (Igbasan et Guenter 1997).

Les inhibiteurs trypsiques sont des peptides résistants à l'hydrolyse *in vitro* (Perrot 1995). Leur teneur élevée en ponts disulfure (Ferrasson *et al* 1995) contribue probablement à leur stabilité.

Les lectines sont réfractaires à l'hydrolyse *in vitro* (Pusztai *et al* 1993, Perrot 1995) et *in vivo* chez le porc (Bertrand *et al* 1988), le rat (Aubry et Boucrot 1986) et le poulet (Crévieu *et al* 1997a). Cette résistance à l'hydrolyse pourrait être due à des liaisons avec des composants glucidiques (sucres, polyosides, glycoprotéines) entraînant un encombrement stérique (Pusztai *et al* 1993). Elles ont aussi une structure secondaire riche en feuillets β (48 %, Foriers *et al* 1981) et une hydrophobie importante (Trowbridge 1974) qui pourraient contribuer à leur résistance à l'hydrolyse.

Les études *in vitro* et *in vivo* suggèrent que la structure des protéines détermine leur sensibilité à l'hydrolyse. Ainsi certaines caractéristiques structurales semblent néfastes (tableau 4) : une hydrophobie importante, une structure secondaire riche en feuillets β, une structure compacte. De plus la présence de ponts disulfure n'est pas favorable à l'hydrolyse (Hancock *et al* 1994). Ainsi la formation de ponts disulfure dans les prolamines au cours de la maturation des graines du sorgho entraîne une baisse d'hydrolyse *in vitro* (Oria *et al* 1995). L'hydrolyse trypsique *in vitro* de la glycinine est augmentée par réduction des ponts disulfure (Kella *et al* 1986). De même la glycosylation des protéines pourrait expliquer une faible hydrolyse car cela contribuerait à la stabilité de la structure tertiaire des glycoprotéines ou constituerait des blocages stériques face à l'attaque protéolytique, comme dans le cas de la phaséoline (Chang et Satterlee 1981) ou les mucines (Carlstedt *et al* 1993). Certaines caractéristiques pourraient au contraire être favorables à l'hydrolyse, comme la teneur élevée en coudes β dans les structures secondaires, exposant ainsi les liaisons peptidiques aux enzymes comme dans le cas de la viciline (27,5 %), contrairement à la phaséoline (8,5-17 %) et à l'albumine PA2 (17 %) (Gruen *et al* 1987, Deshpande et Damodaran 1989a).

En plus de ces différents composants de la matière première et de l'aliment (facteurs antinutritionnels, glucides, lipides, structure des protéines), les traitements technologiques peuvent intervenir pour modifier l'hydrolyse des protéines, et donc leur digestibilité.

2.3 / Effet des traitements technologiques

Parmi les différents traitements technologiques utilisés industriellement au cours de la fabrication d'aliments composés pour monogastriques, deux sont couramment employés et peuvent modifier la digestibilité des protéines de pois du régime : le broyage et la granulation. On utilise aussi l'extrusion. D'autres traitements tels que le floconnage et le toastage ont été essayés.

a / Traitement mécanique : le broyage

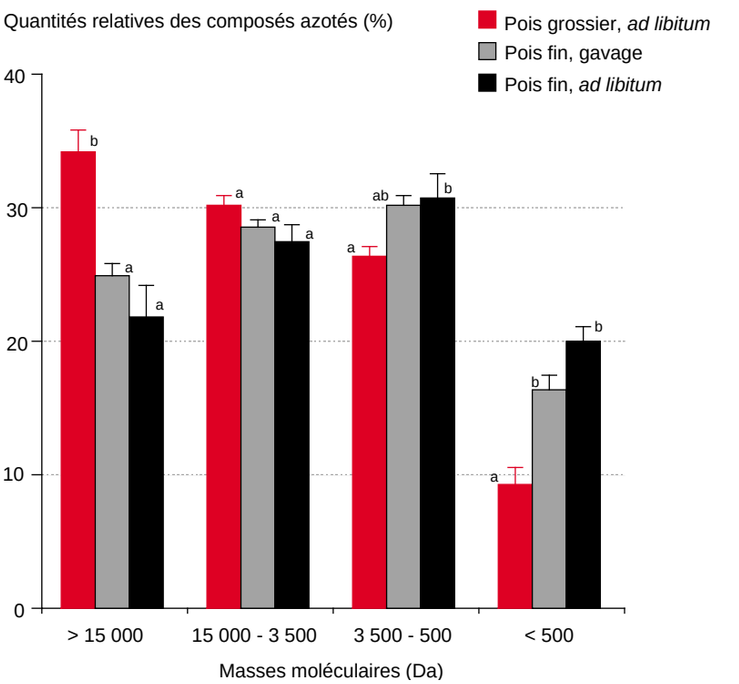
Le broyage consiste à réduire la taille des particules, ce qui peut favoriser l'accessibilité des substrats aux enzymes. Ainsi, l'effet favo-

rable d'un broyage fin est parfaitement démontré dans le cas des céréales chez le porc (Wünsche *et al* 1988) et le poulet (Saunders *et al* 1969). Mais, dans le cas des graines de légumineuses, aucune étude utilisant des broyages industriels, ne met en évidence une amélioration significative de la digestibilité des protéines aussi bien chez le porc (Wünsche *et al* 1988) que chez l'oiseau (Lacassagne *et al* 1991). Ceci pourrait être dû à une hétérogénéité de la distribution granulométrique des farines broyées dans des conditions industrielles. En effet des broyages expérimentaux montrent que la granulométrie a un effet significatif sur la digestibilité des protéines de pois. Ainsi, chez le porc, un microbroyage du pois (25 µm) entraine une augmentation de la digestibilité d'au moins 10 points par rapport à du pois broyé grossièrement (grille de 2,5 mm) (Hess *et al* 1998). Chez le poulet, une granulométrie très fine (diamètre moyen de 30 µm) et une granulométrie grossière (grille de 1,5 mm ; 900 µm) conduisent à des digestibilités de 78 et 71 % respectivement, la différence étant due à une hydrolyse plus importante des protéines situées dans les fines particules (Crévieu *et al* 1997b). Cependant dans le cas du broyage fin, l'amélioration de la digestibilité atteint probablement une limite, comme le montrent les fortes proportions de peptides et d'acides aminés présentes en fin d'intestin grêle (figure 3). Ces composants issus de l'hydrolyse des protéines ne sont pas digérés par les animaux. L'hydrolyse rapide des protéines dès le jéjunum supérieur pourrait en être à l'origine car elle conduit à une libération massive de peptides (Crévieu *et al* 1997b) qui pourraient générer une augmentation de la pression osmotique susceptible d'accélérer le transit et de réduire ainsi les possibilités d'hydrolyse et d'absorption des produits terminaux de la digestion. La présence de ces peptides pourrait aussi être due à des capacités d'hydrolyse (sécrétions enzymatiques) et/ou d'absorption insuffisantes des animaux. Cette dernière hypothèse prévaudrait chez certaines espèces sélectionnées pour leur croissance rapide comme les poulets de chair, chez lesquels les capacités d'absorption des nutriments seraient limitantes (Obst et Diamond 1992). On peut remarquer que des proportions importantes de peptides ont aussi été observées en fin d'intestin grêle du porcelet (Peiniau *et al* 1996). Les jeunes animaux, toutes espèces confondues, pourraient donc avoir des capacités digestives limitantes. Cependant, la persistance de ces peptides pourrait aussi être liée à leurs caractéristiques physicochimiques qui ralentiraient leur hydrolyse.

b / Traitements thermiques

La granulation est un traitement hydrothermique très largement utilisé en alimentation animale. Elle permet de réduire le volume apparent de l'aliment et de limiter le tri par les animaux. Ce traitement consiste à compacter dans une presse un produit pulvérulent, après éventuellement injection de vapeur vive dans la masse de farine à l'aide d'un conditionneur (10 à 50 secondes). Les rouleaux de la presse

Figure 3. *Répartition des composés azotés d'origine protéique en fonction de leur masse moléculaire dans les contenus de la partie terminale de l'intestin grêle de poulets (souche Ross, 7 animaux âgés de 25 jours) ayant consommé des régimes dont la source unique de protéines (20 %) est du pois broyé grossièrement (900 µm) ou très finement (30 µm) (d'après Crévieu et al 1997b).*



forcent le mélange à travers les orifices d'une filière (5 à 18 secondes), créant ainsi une pression à l'intérieur de celle-ci (600 à 1 200 bars). Le produit en sortie de la presse atteint une température de 65 à 98°C (Kaysi et Melcion 1992).

Dans le cas des protéines de pois, ce traitement hydrothermique n'a pas d'effet sur la digestion chez le porc en croissance-finition, aussi bien dans le cas des variétés d'hiver que de printemps (80°C, Grosjean *et al* 1989). Chez le poulet, ce traitement thermique entraîne une augmentation de la digestibilité des protéines de graines de pois (variété de printemps et d'hiver), qui reste cependant modeste (3 à 5 points) par rapport aux augmentations observées dans le cas de l'amidon (10 à 15 points) (Carré *et al* 1991). Cette augmentation est plus marquée chez le jeune que chez l'adulte. Comme la teneur en inhibiteurs trypsiques n'est pas modifiée au cours de ce traitement (Carré et Conan 1989, Grosjean *et al* 1989), l'augmentation de la digestion des protéines observée chez le poulet pourrait être due à la rupture des parois cellulaires qui augmente l'accessibilité des nutriments aux enzymes digestives.

L'extrusion est un traitement thermique beaucoup plus drastique que la granulation (Kaysi et Melcion 1992). Le principe est de soumettre une matière première ou un mélange, plus ou moins hydratés, à l'effet conjugué de la pression (jusqu'à 200 bars) et de la température (de 90 à 250°C) pendant un temps court (inférieur à 30 secondes), et à les mettre

Le broyage du pois améliore la digestion de ses protéines chez le poulet, mais de façon limitée.

en forme par passage forcé au travers d'une ou plusieurs filières.

Chez le porc, ce traitement n'a aucun effet sur la digestion des protéines de pois de printemps (Marlier *et al* 1989, Bengala Freire *et al* 1991), mais a un effet positif dans le cas de variétés d'hiver (30 secondes, 150°C : Bengala Freire *et al* 1991). Chez le coq, l'extrusion (150°C) entraîne aussi une légère augmentation de la digestibilité des protéines (Huyghebaert *et al* 1979). Cette amélioration pourrait être due aussi bien à la rupture des parois cellulaires qu'à la dénaturation des protéines. Ce dernier effet peut être indirect, par destruction des facteurs antinutritionnels de nature protéique tels que les inhibiteurs trypsiques, ou direct, du fait de la dénaturation des protéines de réserve de la graine. Ainsi l'effet bénéfique de l'extrusion sur la digestion iléale des protéines de pois chez le porcelet observé par Bengala Freire *et al* (1991) limité aux variétés d'hiver est probablement dû à l'inactivation des inhibiteurs trypsiques (Kaysi et Melcion 1992). L'effet direct de la dénaturation pourrait être dû aux modifications structurales bénéfiques des protéines sous l'effet de la température et de la pression. Il y aurait rupture et formation de nouveaux ponts disulfure, formation de liaisons non covalentes favorisant la formation d'agrégats, et la formation de feuillets β anti parallèles dans la structure secondaire des protéines (Camire 1998).

Les traitements thermiques peuvent avoir un effet favorable, mais les conditions de traitement doivent être maîtrisées.

On peut noter que d'autres traitements thermiques ont été essayés sur le pois, comme le toastage et le floconage. Le toastage, qui consiste en un chauffage direct de la graine, peut améliorer la digestibilité iléale des acides aminés chez le porc, mais les résultats sont variables (130°C, 3-4 min : Canibe et Eggum 1997), ce qui nécessite des études ultérieures. Le floconnage, qui est un traitement hydrothermique suivi d'un aplatissement des graines, n'a pas d'effet sur la digestibilité des protéines chez le porc (Marlier et al 1989).

Il faut noter que les traitements thermiques qui montrent parfois un effet bénéfique sur la digestion des protéines, peuvent, s'ils sont utilisés dans des conditions excessives, avoir des conséquences défavorables. En effet les acides aminés initialement protégés dans la structure native des protéines, deviennent plus exposés et peuvent réagir avec les autres composants de l'aliment. Ainsi, de la lysine peut être perdue par réaction de Maillard, sans qu'il y ait de sucres réducteurs à cause de la fragmentation de l'amidon (Camire 1998).

Comme on vient de le voir, l'effet des traitements technologiques varie d'une étude à l'autre. Selon les animaux (espèce, âge), les résultats peuvent différer, mais les conditions de traitement utilisées (forces mécaniques, température, temps, teneur en eau) ont un rôle déterminant sur les caractéristiques finales des aliments et donc sur leur digestibilité chez l'animal.

Conclusions et perspectives

Le déroulement de la digestion des protéines le long du tube digestif s'effectue en plusieurs étapes. Dans un premier temps les protéines sont hydrolysées par des endoprotéases, puis les produits de cette hydrolyse sont soumis à des exopeptidases et les peptides et/ou acides aminés issus de ces étapes sont absorbés. La réalisation de ces processus dépend de plusieurs facteurs. Tous les constituants de l'aliment peuvent être impliqués. Tout d'abord les protéines doivent être accessibles aux enzymes digestives. Les parois cellulaires doivent donc être rompues. Ceci peut être effectué par l'utilisation de traitements mécaniques ou thermiques. Les différents constituants de l'aliment peuvent alors intervenir et modifier la digestion comme les facteurs antinutritionnels ou d'autres composants tels que les glucides et les lipides. La structure des protéines elle aussi intervient. En effet certaines structures protéiques sont moins favorables à l'hydrolyse que d'autres. Par exemple dans le cas du pois, la plupart des globulines sont mieux hydrolysées que les albumines. La meilleure connaissance des fractions résistantes permettra d'orienter les sélections de variétés destinées à l'alimentation animale.

De plus durant la digestion des protéines le long du tube digestif, des protéines endogènes sont sécrétées (enzymes, mucines) dans des proportions très variables, dont l'origine reste encore inexpliquée. Ces composants s'ajoutent aux protéines alimentaires non hydrolysées ainsi qu'à leurs produits d'hydrolyse non digérés par l'animal et contribuent à la pollution azotée. Par ailleurs, ils peuvent constituer un substrat pour les microorganismes du tube digestif qui, dans certains cas, peuvent être pathogènes et ne pourront plus dans un avenir très proche être contrôlés par l'apport d'antibiotiques dans les aliments des animaux d'élevage. Ces différents composants azotés constitués de protéines et de peptides devront donc à l'avenir être étudiés pour déterminer leur origine (alimentaire ou endogène) et proposer des solutions permettant de les réduire.

Remerciements

L'auteur remercie B. Carré et N. Rideau pour la relecture de ce texte.

Références

Almirall M., Brufau J., Esteve-Garcia E., 1993. Effects of intestinal viscosity on digestive enzyme activities of intestinal content and ileal digestibilities of poultry fed barley diets at different ages supplemented with b-glucanases. In : C. Wenk, M. Boessinger (eds), Enzymes in animal nutrition, Proc. 1st symposium Karthause Ittingen, Switzerland, 13-16 october 1993, 69-72.

Aubry M., Boucrot P., 1986. Etude comparée de la digestion des viciline, légumine et lectine radiomarquées de Pisum sativum chez le rat. Ann. Nutr. Metab., 30, 175-182.

Begbie R., Ross A.W., 1993. Resistance of the Kidney Bean Reserve Protein, Phaseolin, to Proteolysis in the Porcine Digestive Tract. J. Sci. Food Agric, 61, 301-307.

Bengala Freire J., Aumaitre A., Peiniau J., 1991. Effects of feeding raw and extruded peas on ileal digestibility, pancreatic enzymes and plasma glucose and insulin in early weaned pigs. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 65, 154-164.

Bertrand G., Sève B., Gallant D.J., Tome R., 1988. Absence d'effet antinutritionnel des lectines de pois, sous forme native ou purifiée, chez le porcelet. Comparaison avec les lectines natives de soja. Sci. Aliments, 8, 187-212.

Buraczewska L., Gdala J., Grala W., 1989. Ileal digestibility of protein in pigs fed diets with peas of variable content of protein and tannins. In : J. Huisman, A.F.B. Van der Poel, I.E. Liener (eds), Proc. 1st Intl Workshop on Antinutritional Factors in Legume Seeds, 181-184. Wageningen, The Netherlands.

Bush R.S., Toullec R., Caugant I., Guilloteau P., 1992. Effects of raw pea flour on nutrient digestibility and immune responses in the preruminant calf. J. Dairy Sci., 75, 3539-3552.

Camire M.E., 1998. Chemical changes during extrusion cooking. Recent advances. Adv. Exp. Med. Biol., 434, 109-21.

Canibe N., Eggum B.O., 1997. Digestibility of dried and toasted peas in pigs .1. Ileal and total tract digestibilities of carbohydrates - .2. Ileal and total tract digestibilities of amino acids. Anim. Feed Sci. Technol., 64, 311-325.

Carlstedt I., Herrman A., Karlsson H., Sheehan J., Fransson L.A., Hansson G.C., 1993. Characterization of two different glycosylated domains from the insoluble mucin complex of rat small intestine. J. Biol. Chem., 268, 18771-18781.

Carré B., Conan L., 1989. Relationship between trypsin-inhibitor content of pea seds and pea protein digestibility in poultry. In : J. Huisman, A.F.B. Van der Poel, Liener, I.E. (eds), Proc. 1st Intl Workshop on Antinutritional Factors in Legume Seeds, 103-106. Wageningen, The Netherlands .

Carré B., Plouzeau M., Leclercq B., 1984. Les glucides des principales matières premières utilisées en aviculture. Revue Alimentation animale, 381, 46-51.

Carré B., Beaufils E., Melcion J.P., 1991. Evaluation of protein and starch digestibility and energy value of pelleted or unpelleted pea seed from winter or spring cultivars in adult and young chickens. J. Agric. Food Chem., 39, 468-472.

Carré B., Gomez J., Melcion J.P., Giboulot B., 1994. La viscosité des aliments destinés à l'aviculture. Utilisation pour prédire la consommation et l'excrétion d'eau. INRA Prod. Anim., 7, 369-379.

Chang K.C., Satterlee L.D., 1981. Isolation and characterization of the major protein from great northern beans (Phaseolus vulgaris). J. Food Sci., 46, 1368-1373.

Conan L., Carré B., 1989. Effect of autoclaving on metabolizable energy value of smooth pea seed (Pisum sativum) in growing chicks. Anim. Feed Sci. Technol., 26, 337-345.

Crévieu I., Guéguen J., Bérot S., 1996. Large scale procedure for fractionation of albumins and globulins from pea seeds. Nährung, 40, 237-244.

Crévieu I., Carré B., Chagneau A.M., Quillien L., Guéguen J., Bérot S., 1997a. Identification of resistant pea (Pisum sativum L.) proteins in the digestive tract of chickens. J. Agric. Food Chem., 45, 1295-1300.

Crévieu I., Carré B., Guéguen J., Melcion J.P., Chagneau A.M., 1997b. Effect of particle size of pea (Pisum sativum L.) flours on the digestion of their proteins in the digestive tract of broilers. J. Sci. Food Agric., 75, 217-226.

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.

Davey R.A., Dudman W.F., 1979. The carbohydrate of storage glycoproteins from seeds of Pisum sativum: Characterization and distribution on component polypeptides. Aust. J. Plant. Physiol., 6, 435-447.

Degolier T.F., Duke G.E., Carraway R.E., 1997. Neurotensin decreases pepsin output and gastrointestinal motility in chickens. Poult. Sci., 76, 1435-1439.

De Rham O., Jost T., 1979. Phytate-protein interactions in soybean extracts and low-phytate soy protein products. J. Food Sci., 44, 596-601.

Deshpande S.S., Damodaran S., 1989a. Structure-Digestibility relationship of legume 7S proteins. J. Food Sci., 54, 108-113.

Deshpande S.S., Damodaran S., 1989b. Effect of phytate on solubility, activity and conformation of trypsin and chymotrypsin. J. Food Sci., 54, 695-699.

Everts H., Dekker R.A., Smits B., Cone J.W., 1996. The digestion of maize and native pea starch in the small intestine of pigs. Proc. Nutr. Soc., 55, 59A.

Ferrasson E., Quillien J., Guéguen J., 1995. Amino acid sequence of a Bowman-Birk proteinase inhibitor from pea seeds. J. Prot. Chem., 14, 467-475.

Foriers A., Lebrun E., Van Rapenbusch R., De Neve R., Strosberg A.D., 1981. The structure of the lentil (Lens culinaris) lectin. Amino acid sequence determination and prediction of the secondary structure. J. Biol. Chem., 256, 5550-5560.

Grosjean F., Bourdon D., Theillaud-Ricca V., Castaing J., Beague E., 1989. Comparaison des pois d'hiver et de printemps dans des aliments pour porc charcutier présentés en farine ou en granulés. Journées de la Recherche Porcine en France, 21, 59-68.

Grosjean F., Jondreville C., Van Cauwenberghe S., Williatte I., Gatel F., Peyronnet C., 1997. Pea protein and amino acid ileal digestibility in growing pig. In : J.P. Laplace, C. Février et A. Barbeau (eds), Digestive physiology in pigs, 372-376. EAAP publication n°88, Wageningen, The Netherlands.

Gruen L.C., Guthrie E., Blagrove R.J., 1987. Structure of a major pea seed albumin: implication of a free sulphydryl group. J. Sci. Food Agric., 41, 167-178.

Guéguen J., Cerletti P., 1994. Proteins of some legumes seeds: soybean, pea, fababean and lupin. In : B.J.F. Hudson (ed), New and developing sources of food proteins, 145-193. Chapman and Hall, USA.

Gwiazda S., Schwenke K.D., Rutkowski A., 1980. Isolation and partial characterization of proteins from pea (Pisum sativum L.). Nährung, 24, 939-950.

Hancock K.R., Ealing P.M., White D.W., 1994. Identification of sulphur-rich proteins which resist rumen degradation and are hydrolysed rapidly by intestinal proteases. Br. J. Nutr., 72, 855-863.

Hess V., Thibault J.N., Duc G., Melcion J.P., Van Eys J., Sève B., 1998. Influence de la variété et du microbroyage sur la digestibilité iléale de l'azote et des acides aminés de pois. Digestibilité réelle de l'azote et pertes endogènes spécifiques. Journées Recherche porcine en France, 30, 223-229.

Higgins T.J.V., Chandler P.M., Randall P.J., Spencer D., Beach L.R., Blagrove R.J., Kortt A.A., Inglis A.S., 1986. Gene structure, protein structure, and regulation of the synthesis of sulphur-rich protein in pea seeds. J. Biol. Chem., 261, 11124-11130.

Hlödversson R., 1987. The nutritive value of white and dark flowered cultivars of pea for growing-finishing pigs. Anim. Feed Sci. Technol., 17, 245-255.

Huisman J., Jansman J.M., 1991. Dietary effects and some analytical aspects of antinutritional factors in peas (Pisum sativum), common beans (Phaseolus vulgaris) and soyabeans (Glycine max. L.) in monogastric farm animals. A literature reviews. Nutr. Abstr. Rev., Series B, 61, 901-921.

Huisman J., Le Guen M.P., 1991. Effects of pea ANF's and pea carbohydrates on ileal protein digestibility of piglets, 60-66. EAAP Publication n°54, Wageningen, The Netherlands.

Huyghebaert G., Fontaine G., de Groote G., 1979. Détermination de la valeur alimentaire des pois (Pisum sativum) et des féverole (Vicia faba) au moyen d'essais de digestibilité avec des coqs adultes. Rev. Agric., 32, 759-777.

Igbasan F.A., Guenter W., 1996. The evaluation and enhancement of the nutritive value of yellow-, green- and brown-seeded pea cultivars for unpelleted diets given to broiler chickens. Anim. Feed Sci. Technol., 63, 9-24.

Igbasan F.A., Guenter W., Slominski B.A., 1997. Field peas: Chemical composition and energy and amino acid availabilities for poultry. Can. J. Anim Sci., 77, 293-300.

Imbeah M., Sauer W.C., 1991. The effect of dietary level of fat on amino acid digestibilities in soybean meal and canola meal and on rate of passage in growing pigs. Livest. Prod. Sci., 29, 227-239.

Jansman A.J.M., Verstegen M.W., Huisman J., 1993. Effects of dietary inclusion of hulls of faba beans (Vicia faba L.) with a low and high content of condensed tannins on digestion and some physiological parameters in piglets. Anim. Feed Sci. Technol., 43, 239-257.

Jondreville C., Grosjean F., Buron G., Peyronnet C., Beneytout J.L., 1992. Comparaison of four pea varieties in pig feeding through digestibility and growth performance results. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 68, 113-122.

Kaysi Y., Melcion J.P., 1992. Traitements technologiques des protéagineux pour le monogastrique : exemples d'application à la graine de féverole. INRA Prod. Anim., 5, 3-17.

Kella N.K.D., Barbeau W.E., Kinsella J.E., 1986. Effect of oxidative sulfitolysis of disulfide bonds of glycinin on solubility, surface hydrophobicity, and in vitro digestibility. J. Agric. Food Chem., 34, 251-256.

Knuckles B.E., Kuzmicky D.D., Gumbmann M.R., Betschart A.A., 1989. Effect of myo-inositol phosphate esters on in vitro and in vivo digestion of protein. J. Food Sci., 54, 1348-1350.

Kussaibati R., Leclercq B., Guillaume J., 1983. Effets du calcium, du magnésium et des sels biliaires sur l'énergie métabolisable apparente et la digestibilité des lipides, de l'amidon et des protéines chez le poulet en croissance. Ann. Zootech., 32, 7-20.

Lacassagne L., Melcion J.P., de Monredon F., Carré B., 1991. The nutritional values of faba bean flours varying in their mean particle size in young chickens. Anim. Feed Sci. Technol., 34, 11-19.

Lallès J.P., Toullec R., 1996. Digestion des protéines végétales et hypersensibilité digestive chez le veau préruminant. INRA Prod. Anim., 9, 255-264.

Lallès J.P., Quillien L., Toullec R., 1996. Immunochemical identification of pea protein fragments escaping small intestinal digestion in the preruminant calf. Proc. Conf. on plant proteins from European crops, Nantes, France, 55.

Lawrence M.C., Izard T., Beuchat M., Blagrove R.J., Colman P.M., 1994. Structure of phaseolin at 2-center-dot-2 angstrom resolution. Implication for a common vicilin/legumin structure and the genetic-engineering of seed storage proteins. J. Mol. Biol., 238, 748-776.

Leclercq B., 1996. Les rejets azotés issus de l'aviculture : importance et progrès envisageables. INRA Prod. Anim., 9, 91-101.

Le Guen M.P., Tolman G.H., Huisman J., 1991. Antibodies formation against pea proteins in piglets. In : M.W.A. Verstegen, J. Huisman, L.A. den Hartog (eds), Digestive Physiology in Pigs, 99-103. EAAP Publication n°54, Wageningen, The Netherlands.

Le Guen M.P., Huisman J., Guéguen J., Beelen G., Verstegen M.W.A., 1995. Effects of a concentrate of pea antinutritional factors on pea protein digestibility in piglets. Livest. Prod. Sci., 44, 157-167.

Lessire M., Leclercq B., Conan L., Hallouis J.M., 1985. A methodological study of the relationship between the metabolizable energy values of two meat meals and their level of inclusion in the diet. Poult. Sci., 64, 1721-1728.

Leterme P., Beckers Y., Thewis A., 1990a. Trypsin inhibitors in peas: Varietal effect and influence on digestibility of crude protein by growing pigs. Anim. Feed Sci. Technol., 29, 45-55.

Leterme P., Monmart T., Baudart E., 1990b. Amino acid composition of pea (Pisum sativum) proteins and protein profil of pea flour. J. Sci. Food Agric., 53, 107-110.

Li D., Che X., Wang Y., Hong C., Thacker P.A., 1998. Effect of microbial phytase, vitamin D-3, and citric acid on growth performance and phosphorus, nitrogen and calcium digestibility in growing swine. Anim. Feed Sci. Technol., 73, 173-186.

Lin H.C., Zhao X.T., Wang L.J., 1997. Intestinal transit is more potently inhibited by fat in the distal (ileal Brake) than in the proximal (jejunal brake) gut. Dig. Dis. Sci., 42, 19-25.

Longstaff M., McNab J.M., 1991. The inhibitory effects of hull polysaccharides and tannins of field beans (*Vicia faba L.*) on the digestion of amino acids, starch and lipid and on digestive enzyme activities in young chicks. Br. J. Nutr., 65, 199-216.

Mariscal-Landin G., 1992. Facteurs de variation de l'utilisation digestive des acides aminés chez le porc. Thèse Université de Rennes 1, 134 p.

Mariscal-Landin G., Sève B., Colléaux Y., Lebreton Y., 1995. Endogenous amino nitrogen collected from pigs with end to end ileorectal anastomosis is affected by the method of estimation and altered by dietary fiber. J. Nutr., 125, 136-146.

Marlier L., Focant M., Allart B., Vanbelle M., 1989. Effets du floconnage et de l'extrusion sur la valeur alimentaire du pois protéagineux, pour le porc charcutier. Ann. Zootech., 38, 237-245.

Martin M.T., Gonalons E., Fernandez E., 1998. Contribution of inhibitory neurotransmitters to the CCK induced relaxation of the circular muscle of avian ileum. Life Sci., 62, 937-46.

Martinez V., Jimenez M., Gonalons E., Vergara P., 1995. Intraluminal lipids modulate avian gastrointestinal motility. Am. J. Physiol., 269, R445-R452.

Mason V.C., 1984. Metabolism of nitrogenous compounds in the large gut. Proc. Nutr. Soc., 43, 45-53.

Mikola J., 1983. Proteinases, peptidases, and inhibitors of endogenous proteinases in germinating seeds. In : J. Daussant, J. Mossé, J. Vaugha (eds), Seed proteins, 35-52.

Mossé J., Huet J.C., Baudet J., 1987. Changement de la composition en acides aminés des graines de pois en fonction de leur taux d'azote. Sci. Aliments, 7, 301-324.

Mroz Z., Jongbloed A.W., Kemme P.A., 1994. Apparent digestibility and retention of nutrients bound to phytate complexes as influenced by microbial phytase and feeding regimen in pigs. J. Anim. Sci., 72, 126-132.

Nielsen S.S., Deshpande S.S., Hermodson M.A., Scott M.P., 1988. Comparative digestibility of legume storage proteins. J. Agric. Food Chem., 36, 896-902.

Obst B.S., Diamond J., 1992. Ontogenesis of intestinal nutrient transport in domestic chickens (Gallus gallus) and its relation to growth. Auk., 109, 451-464.

O' Dell B.L., de Boland A., 1976. Complexation of phytate with proteins and cations in corn germ and oilseed meal. J. Agric. Food Chem., 24, 804-808.

Oria M.P., Hamaker B.R., Shull J.M., 1995. In vitro protein digestibility of developing and mature sorghum grain in relation to a-, b- and g-kafirin disulfide crosslinking. J. Cereal Sci., 22, 85-93.

Parsons C.M., Potter L.M., Brown R.D., 1983. Effects of dietary carbohydrate and of intestinal microflora on excretion of endogenous amino acids by poultry. Poult. Sci., 62, 483-489.

Parsons C.M., Zhang Y., Araba M., 1998. Availability of amino acids in high-oil corn. Poult. Sci., 77, 1016-1019.

Peiniau J., Aumaitre A., Lebreton Y., 1996. Effects of dietary protein sources differing in solubility on total tract and ileal apparent digestibility of nitrogen and pancreatic enzymes activity in early weaned pigs. Livest. Prod. Sci., 45, 197-208.

Perez J.M., Bourdon D., 1992. Energy and protein value of peas for pigs: synthesis of French results. First European Conference on Grain Legumes, Angers, France, 489-490.

Perrot C., 1995. Les protéines de pois : de leur fonction dans la graine à leur utilisation en alimentation animale. INRA Prod. Anim., 8, 151-164.

Pointillart A., 1994. Phytates, phytases : leur importance dans l'alimentation des monogastriques. INRA Prod. Anim., 7, 29-39.

Pusztai A., Watt W.B., 1970. The isolation and characterization of a major antigenic and non-haemagglutinating glucoprotein from Phaseolus vulgaris. Biochim. Biophys. Acta, 207, 413-431.

Pusztai A., Begbie R., Grant G., Ewen S.W.B., Bardocz S., 1993. Indirect Effects of Food Antinutrients on Protein Digestibility and Nutritional Value of Diets. In : M. F. Fuller (ed), In Vitro Digestion For Pigs and Poultry, 45-61. CAB International, Wallingford, UK.

Rhône Poulenc, 1993. Rhodimet nutrition guide. 2ème ed, 55 p. Rhône Poulenc, Antony, France.

Sathe S.K., Deshpande S.S., Salunkhe D.K., 1984. Dry beans of Phaseolus. A review. Part 1. Chemical composition: proteins. Crit. Revs. Food Sci. Nutr., 20, 1-46.

Saunders R.M., Walker H.G., Kohler G.O., 1969. Aleurone cells and the digestibility of wheat mill feeds. Poult. Sci., 48, 1497-1503.

Schroeder H.E., 1984. Major Albumins of Pisum Cotyledons. J. Sci. Food Agric., 35, 191-198.

Sebastian S., Touchburn S.P., Chavez E.R., 1998. Implications of phytic acid and supplemental microbial phytase in poultry nutrition: a review. World Poult. Sci. J., 54, 27-47.

Sell D.R., Reed W.M., Chrisman C.L., Rogler J.C., 1985. Mucin excretion and morphology of the intestinal tract as influenced by sorghum tannins. Nutr. Report Intern., 31, 1369-1374.

Sève B., 1994. Alimentation du porc en croissance : intégration des concepts de protéine idéale, de disponibilité digestive des acides aminés et d'énergie nette. INRA Prod. Anim., 7, 275-291.

Siriwan P., Bryden W.L., Annison E.F., 1989. Effect of dietary fibre and protein levels on endogenous protein secretions in chickens. Proc. Nutr. Soc. Aust., 14, 143.

Subirade M., Guéguen J., Pézolet M., 1994. Conformational changes upon dissociation of a globular protein from pea: a Fourier transform infrared spectroscopy study. Biochem. Biophys. Acta, 1205, 239-247.

Torralardona D., Pérez Moya S., Pérez Vendrell A.M., Brufau J., 1997. Effect of exogenous cell wall degrading enzymes on the apparent ileal digestibility of barley nutrients for growing pigs. In : J.P. Laplace, C. Février, A. Barbeau (eds), Proceedings of the VIIth international Symposium organized by INRA-SRP and EEAP, Digestive physiology in pigs, 458-461. Saint Malo, France.

Trevino J., Centeno C., Brenes A., Yuste P., Rubio L., 1990. Effect of dietary oligosaccharides on the digestion of pea starch by growing chicks. Anim. Feed Sci. Technol., 30, 313-319.

Trowbridge I.S., 1974. Isolation and chemical characterization of a mitogenic lectin from Pisum sativum. J. Biol. Chem., 249, 6004-6012.

Vallet J., Rouanet J.M., Besancon P., 1994. Dietary grape seed tannins: effects of nutritional balance and on some enzymic activities along the crypt-villus axis of rat small intestine. Ann. Nutr. Metab., 38, 75-84.

Wenzel M., Gers-Barlag H., Schimpl A., Rudiger H., 1993. Time course of lectin and storage protein biosynthesis in developing pea (Pisum sativum) seeds. Biol. Chem. Hoppe Seyler., 374, 887-894.

Wright D.J., 1987. The seed globulins. In : B.J.F. Hudson (ed), Developpements in food proteins, 81-157. Elsevier Applied Science, London.

Wünsche J., Herrmann U., Meinl M., Henning U., 1988. Influence of exogenous factors on the precaecal nutrient and amino acid absorption using pigs with ileo-rectal anastomoses. 2. Influence of the fineness of grinding of vegetable high-protein concentrates in diets. Arch. Anim. Nutr., 38, 37-52.

Abstract

Protein digestion of leguminous in monogastrics. Pea proteins as an example.

Present knowledge of protein digestion in monogastrics, mainly pig and poultry, is reviewed. Peas, an important protein-rich European crop, is chosen as an example because of the high variability of digestibility of the proteins of this feedstuff. After recalling pea protein composition and digestibilities in monogastrics, various compounds potentially implied in explaining the observed results, are presented. Thus antinutritional factors of this leguminous can have negative effect. Other pea or diet compounds such as saccharides or lipids may be implied. Moreover, protein structure leads to various susceptibilities to hydrolysis. Thus some characteristics, such as an important hydrophobicity, high glycosylation level, secondary structure rich in β-sheets, compact tertiary structure and disulphide bonds seem to have a negative impact on protein hydrolysis. Technological processings applied on the diet may affect protein digestion. Thus, grinding can increase digestion. Likewise thermal processings such as pelleting or extrusion, in so far as used conditions are not extreme, can improve protein digestion.

Thus excreted nitrogen from a digestive origin depends on several factors. This nitrogen loss is composed of proteins and peptids also, whose origin must be determined (feed or endogen) in order to suggest solutions to decrease it.

Crévieu-Gabriel I., 1999. Digestion des protéines végétales chez les monogastriques. Exemple des protéines de pois. INRA Prod. Anim., 12, 147-161.