

Comment mieux valoriser les protéagineux et oléagineux en alimentation des ruminants

C. Poncet¹, D. Rémond², E. Lepage³, M. Doreau¹

Les graines protéagineuses et oléagineuses ont une teneur élevée en protéines et en énergie, mais leurs protéines sont rapidement dégradées dans le rumen, provoquant un gaspillage d'azote. De nombreuses études ont montré comment diminuer la dégradabilité des protéines, mais les applications sont réduites du fait de l'omnipotence du soja.

RESUME

Des améliorations par la sélection génétique existent mais sont à évaluer. Les graines sont couramment utilisées entières ou très grossièrement aplaties. Cette solution simple a prouvé son efficacité pour protéger les protéines ; elle doit être optimisée et son impact sur la valeur azotée quantifié. Les traitements thermiques foisonnent, mais rares sont ceux qui sont développés en France, excepté l'extrusion et les traitements de chauffage inclus dans les procédés d'extraction de l'huile, fournissant un tourteau de valeur azotée bien supérieure à la graine. Leur efficacité et leurs conditions d'application sont discutées. Les procédés de l'huilerie apparaissent facilement adaptables ; les traitements chimiques sont seulement évoqués dans leur principe.

MOTS CLES

Colza, féverole, lin, lupin, plante oléagineuse, plante protéagineuse, pois fourrager, soja, tournesol, tourteau, traitement technologique, valeur azotée, valeur alimentaire.

KEY-WORDS

Feeding value, field pea, high-protein crop, horse bean, linseed, lupin, nitrogen value, oil-seed cake, oil-seed crop, rape, soybean, sunflower, technological treatment.

AUTEURS

1 : Unité de Recherches sur les Herbivores, INRA Theix, F-63122 Saint-Genès-Champanelle ; e-mail : poncet@clermont.inra.fr

2 : Unité de Nutrition et Métabolisme Protéique, INRA Theix, F-63122 Saint-Genès-Champanelle.

3 : Valorex, La Messayais, F-35210 Combournillé.

Introduction

Les causes de la faible utilisation des ressources protéiques "métropolitaines" - oléagineux et surtout protéagineux - sont principalement d'ordre économique et politique. La fourniture abondante d'une source protéique de qualité, le tourteau de soja, à des prix très intéressants n'a pas été un facteur de stimulation des recherches nécessaires pour promouvoir la production et l'utilisation par les animaux de sources protéiques faciles à produire en Europe. Il fallait les rendre d'abord attractives telles qu'elles sont, puis techniquement plus compétitives. En l'absence d'une politique volontariste continue, les crises successives de 1973 et de 1992 ont relancé les travaux dans ce sens. Ces élans ont été trop éphémères pour rompre la mouvance productiviste qui a fait la fortune du modèle ensilage de maïs - soja. Solution facile pour l'éleveur et performante pour répondre aux exigences accrues de vaches laitières sans cesse plus productives, elle a occulté l'intérêt de maintenir une certaine diversité dans l'approvisionnement en matières riches en protéines produites localement, nécessaire au plan agronomique et positive au plan économique.

Aujourd'hui, les écueils de la production intensive apparaissent clairement. Les contraintes économiques intègrent de nouvelles composantes telles que la durabilité des systèmes de production, la traçabilité et la qualité des produits. Le contexte est favorable pour promouvoir, en alternative au soja, l'utilisation des protéagineux - pois, lupin, féverole - et des oléagineux - colza, tournesol, lin - sous forme de graine ou de tourteau auprès d'utilisateurs - éleveurs, fabricants d'aliments - acquis à la nécessité du changement vers une plus grande autonomie protéique.

Pour favoriser cette démarche, on dispose d'essais d'alimentation réalisés notamment avec des vaches laitières à différents niveaux de besoin. Ils montrent que des performances identiques à celles réalisées avec du tourteau de soja peuvent être obtenues en remplaçant en totalité ou en grande partie le tourteau de soja par du pois (Petit *et al.*, 1997) ou du lupin (Singh *et al.*, 1995 ; Moss *et al.*, 2000). Cet aspect ne sera pas développé ici. Nous insisterons sur les moyens d'accroître la valeur azotée de ces produits, de manière à favoriser leur emploi par rapport à celui du tourteau de soja. Dans ce cadre, après une présentation sommaire des caractéristiques chimiques et digestives des oléoprotéagineux, les différentes solutions (génétiques, technologiques) pour améliorer la valeur nutritive de ces sources protéiques seront examinées.

Caractéristiques nutritionnelles des oléagineux (graines et tourteaux) et des protéagineux

1. Composition chimique

Les principales caractéristiques chimiques des graines figurent dans les Tables INRA-AFZ (2002). Les valeurs fournies dans le tableau 1 sont des moyennes, mais la variabilité est élevée. Les graines de colza, de tournesol et de lin sont les plus riches en matières grasses (environ 45%) et sont donc les plus concentrées en énergie. Les acides gras (AG) du lin sont riches en acide linoléique (54%), polyinsaturé en oméga 3, particulièrement recherché pour ses effets préventifs sur les maladies cardiovasculaires. Ceux du soja et du tournesol contiennent respectivement 51 et 65% d'acide linoléique (polyinsaturé en oméga 6). Ceux du colza et du lupin contiennent respectivement 58 et 55% d'acide oléique (monoinsaturé). Ces moyennes cachent également une variabilité importante (Doreau *et al.*, 1997). On note l'apparition récente de tournesol riche en acide oléique.

Les teneurs en matières azotées du lupin et de la graine de soja sont voisines et comparables à celles des tourteaux autres que le tourteau de soja qui est le plus riche en azote. Colza, lin, pois ont les teneurs les plus faibles (20-25%), la féverole ayant une position intermédiaire parmi les graines. Ces matières azotées sont majoritairement des protéines. Les albumines et les globulines en représentent l'essentiel, d'où la forte solubilité et dégradabilité de l'azote des graines dans le rumen. La part des albumines, protéines hétérogènes riches en acides aminés (AA) soufrés et en lysine, est minoritaire (10 à 20% dans les légumineuses et le tournesol) à l'exception du colza où elle peut atteindre 45% dans certaines variétés ; celle des globulines, protéines de réserve pauvres en ces AA essentiels de même qu'en tryptophane, varie de 60 à 90% (Guéguen et Lemarié, 1996). Globalement, les légumineuses se caractérisent par des teneurs élevées en lysine et relativement faibles en AA soufrés et en tryptophane à l'exception du soja, mieux équilibré. Le colza, et les oléagineux plus généralement, sont assez bien équilibrés en AA. Les albumines du tournesol (20 à 30% des protéines) sont très riches en cystéine et certaines en méthionine.

Tableau 1 : Composition chimique et valeur alimentaire des oléoprotéagineux.**Table 1 : Chemical composition and feeding value of oil-seed and high-protein crops.**

	Graine oléagineuse				Tourteau				Graine protéagineuse		
	Soja	Colza	Tournesol	Lin	Soja	Colza	Tournesol	Lin	Pois	Lupin	Féverole
MAT (% MS)	40,2	20,7	17,2	25,0	51,6	38,0	37,2	35,9	23,9	38,5	31,1
NDF (% MS)	14,6	19,1	31,0	14,2	13,9	31,9	40,0	25,7	13,9	21,3	15,9
MG (% MS)	21,3	45,5	48,0	36,2	2,2	2,6	1,8	3,4	1,2	9,5	1,3
UFL (% MS)	1,23	1,82	1,55	1,58	1,21	0,96	0,74	0,99	1,20	1,33	1,20
PDIN (g/kg MS)	244	130	104	161	377	247	244	256	150	240	197
PDIE (g/kg MS)	86	66	35	84	261	155	128	202	96	120	113

MAT : matières azotées totales ; NDF : parois extraites au détergent neutre ; MG : matières grasses ; MS : matière sèche

2. Valeur énergétique

La valeur énergétique des tourteaux peut être limitée en raison de leur richesse en parois. Le dépelliculage s'impose pour le tournesol qui, non décortiqué, est très riche en parois (" pailleux "), et pourrait être intéressant pour le lin et le colza. La valeur énergétique des graines est élevée du fait de leur richesse en lipides.

L'apport de lipides dans la ration du ruminant se traduit parfois par des diminutions de la digestibilité des parois, en particulier en cas d'apport de matières grasses polyinsaturées, ce qui est le cas des graines oléagineuses. Cet effet, surtout sensible avec des rations d'ensilage de maïs, est toutefois limité lorsque la ration contient moins de 5% de lipides. Les matières grasses du lin, les seules riches en acide linoléique, sont réputées pour perturber fortement la digestion ruminale. Ce constat provient d'études menées sur moutons à l'entretien recevant plus de 5% d'huile de lin dans leur régime. Des essais récents sur animaux en production ont montré qu'un supplément de 3% d'huile de lin, compatible avec les quantités distribuées en pratique, ne modifiait pas la digestion du reste de la ration (Ueda *et al.*, 2002 en particulier).

3. Utilisation digestive des protéines et valeur azotée

La valeur azotée des aliments est représentée par la quantité d'acides aminés qu'ils fournissent à l'animal après les remaniements dans le rumen et leur absorption dans l'intestin grêle. La synthèse microbienne peut être limitée par l'apport d'azote alimentaire fermentescible ou bien par la disponibilité en énergie produite par les fermentations ruminales. Cela conduit à la définition pour chaque aliment des deux valeurs azotées, PDIE lorsque l'énergie est limitante, PDIN lorsque l'azote est limitant. Chacune d'elle comprend une valeur commune, PDIA, qui représente l'azote alimentaire non dégradé (N *by-pass*), le complément étant essentiellement l'azote microbien. La méthode de référence pour estimer cette fraction est celle des flux digestifs à l'entrée et à la sortie de l'intestin grêle. Une méthode plus simple dite *in sacco* consiste à suivre la disparition des aliments broyés placés dans des sachets incubés dans le rumen (Michalet-Doreau *et al.*, 1987) ; elle a servi à l'élaboration des valeurs PDI des aliments (Vérité *et al.*, 1987). Enfin, des méthodes *in vitro* plus rapides permettent d'estimer la dégradabilité dans du jus de rumen ou par des enzymes du commerce, ou simplement la solubilité des protéines dans une solution tampon (Aufrère *et al.*, 1991). Le changement de ces méthodes d'estimation est en partie à l'origine de la forte diminution des valeurs PDIE des oléoprotéagineux entre les Tables INRA 1977 et celles éditées en 1988.

Les graines d'oléagineux et de protéagineux se caractérisent par une dégradabilité ruminale élevée de l'azote, de 80 à 85% de dégradabilité théorique (DT_N) mesurée par la méthode des sachets. Cette forte dégradabilité se traduit par une faible valeur PDIA et une valeur PDIN largement supérieure à la valeur PDIE. Les variations de valeur azotée entre graines sont liées à leur teneur en protéines, plus élevée pour le soja et le lupin, particulièrement faible pour le tournesol. Toutefois, les graines de soja et de colza ont une proportion d'azote dégradé plus faible que les autres graines : la vitesse de dégradation est plus lente, ce qui favorise la synthèse de protéines microbiennes. Par ailleurs, la digestibilité intestinale de l'azote *by-pass* est élevée et peu

variable entre graines. La valeur PDIE des graines oléagineuses et des protéagineux (sauf le pois) a été réévaluée de 9 à 57% dans les Tables INRA-AFZ (2002) en compilant des résultats obtenus *in sacco*. Toutefois, des résultats sur protéagineux distribués entiers ou concassés montrent que leur valeur PDIE est plus élevée (Cabon *et al.*, 1997 ; Aufrère *et al.*, 2001 ; Poncet et Rémond, 2002, entre autres). Ce handicap pour la promotion de l'utilisation des protéagineux tient au fait que la méthode des sachets de nylon, par son principe et les conditions de standardisation actuelle (broyage des aliments à la grille de 0,8 mm), n'est pas adaptée à la mesure de la DT_N de matières premières dont les protéines sont très solubles et qui sont, dans la pratique, utilisées sous forme grossièrement concassée voire entières. Il serait fort utile de connaître la valeur azotée des protéagineux sous cette forme de présentation. A partir du petit nombre de bilans digestifs duodénaux disponibles, la valeur PDIE du pois, du lupin et de la féverole a pu être calculée et comparée aux valeurs des tables INRA-AFZ (2002). Les valeurs calculées sont légèrement inférieures aux valeurs des tables pour le lupin (94 contre 106 g/kg) mais supérieures pour le pois (109 contre 83 g/kg) et la féverole (113 contre 97 g/kg).

Le déshuilage des graines comporte généralement deux étapes de chauffage. Une cuisson (60 à 100°C selon le type de graine) facilite l'extraction de l'huile lors du pressage. Après extraction de l'huile par le solvant et désolvantation, un chauffage plus poussé, avec éventuellement injection de vapeur à 100-110°C, est destiné à éliminer les derniers résidus de solvant, ainsi que certains facteurs antinutritionnels : inhibiteurs trypsiques, lectines, ... et surtout il réduit la dégradabilité des protéines d'autant plus qu'il est intense et prolongé. La valeur PDIE des tourteaux est donc beaucoup plus élevée que celle des graines en raison de l'accroissement de la teneur en protéines, de la réduction de leur vitesse de dégradation ruminale et en général, de l'augmentation de leur digestibilité intestinale, toutes ces modifications accroissant la valeur PDIA. Les protéines du tournesol sont les plus dégradables, ce qui, associé à une teneur plus faible dans l'aliment, explique la valeur PDIE inférieure à celle des autres tourteaux. Pour tous les tourteaux, les valeurs PDIE restent toutefois inférieures aux valeurs PDIN.

Valorisation attendue par l'amélioration génétique

Il existe une variabilité génétique importante de la teneur en protéines des graines. Ainsi, pour le pois qui a été largement étudié, la teneur en protéines peut varier de 18 à 32%, l'amidon suivant une évolution inverse, pour des génotypes à graine lisse utilisés en alimentation animale (Guéguen et Lemarié, 1996). Bien que le milieu (sol, climat) influe sur la teneur en protéines, il ne modifie pas le classement des variétés (Biarnès *et al.*, 2002). La composition des protéines est aussi sous contrôle génétique. On observe des variations naturelles importantes entre cultivars dans le rapport albumines / globulines (20 à 50% d'albumines chez le pois). Il serait souhaitable d'accroître la teneur en albumines, protéines moins dégradables que les globulines (Aufrère *et al.*, 2001), et plus riches en AA soufrés et en lysine. L'amélioration de la composition en AA indispensables des graines peut être obtenue par transgénèse : l'introduction dans le lupin du gène codant pour une albumine de tournesol, riche en méthionine, a contribué à accroître sa teneur en AA soufrés (White *et al.*, 2001). Une tentative similaire visant à accroître la teneur en AA soufrés et en glycine du soja n'a que partiellement réussi (Clarke et Wiseman, 2000). Par sélection classique, la recherche de variétés d'hiver a permis sur le lupin un accroissement des rendements accompagné d'une augmentation de la teneur en protéines et d'une diminution de leur solubilité (Julier *et al.*, 1993 ; Moss *et al.*, 2001). En revanche, l'examen de 74 génotypes de féverole d'hiver a montré une teneur plus faible en protéines et plus forte en amidon que les féveroles de printemps (Duc *et al.*, 1999).

La teneur en parois, qui peut interagir avec l'utilisation de l'azote, varie de 12 à 25% chez le pois. La teneur en parois des cellules cotylédonaire, leur taille et l'épaisseur de leur paroi varient entre génotypes de pois (Duc *et al.*, 2001). Leur accroissement réduit la digestibilité du pois chez le porc, mais pourrait limiter la dégradation ruminale de l'azote chez le ruminant, en retardant l'attaque enzymatique microbienne.

Enfin, la présence de tanins, que l'amélioration génétique a éliminés pour augmenter la valeur nutritive chez le monogastrique, pourrait permettre de protéger en partie les protéines de la dégradation ruminale, bien que cela reste à confirmer. La variabilité génétique naturelle pour ce caractère est importante (Smulikowska *et al.*, 2001).

Il existe donc, dans la collection de graines existantes, une variabilité génétique sur des caractères susceptibles d'améliorer la valeur azotée des graines oléoprotéagineuses chez le ruminant. Mais cette variabilité a essentiellement été exploitée pour le monogastrique, et dans des directions généralement opposées

à celles recherchées pour le ruminant (faible teneur en parois et en tanins), de manière à obtenir une forte digestibilité de l'azote. Chez le ruminant, ces objectifs tendent à accroître la dégradabilité ruminale des protéines.

Valorisation par les traitements technologiques

1. Principes et limites des principaux traitements

Les traitements mécaniques détruisent la structure initiale des graines en la divisant en particules plus petites par aplatissage ou broyage, c'est-à-dire par écrasement, éclatement (broyeur à marteau) ou cisaillement (broyeur à couteaux). La taille des particules obtenues et leur endommagement déterminent le degré d'exposition des constituants biochimiques aux agents digestifs (microbes du rumen ou enzymes intestinales) et donc la vitesse de leur digestion. Ces traitements varient dans une très large gamme. Généralement, les graines oléoprotéagineuses ont été utilisées sous forme entière ou divisées en deux ou quatre parties par aplatissage grossier (taille moyenne des particules voisine de 5 mm) ou après broyage à la grille de 2 ou 3 cm. Ce traitement sépare en grande partie les pellicules ou coques. La structure tissulaire est alors conservée en grande partie. A l'opposé, le broyage à la grille de 3 mm, voire 1 mm, suivi d'une agglomération détruit la structure des tissus.

Les traitements thermiques peuvent être subdivisés en 3 groupes se différenciant par le nombre de paramètres mis en jeu :

Les traitements thermiques par voie sèche où la chaleur est transmise par conduction (colonne de cuisson, désolvanteur - toaster), par convection (four conventionnel) et rayonnement (infra-rouges, micro-ondes). Les procédés industriels sont connus sous les noms de torréfaction (*roasting* en anglais), d'expansion (ou *popping*) et d'infranisation (*micronisation* en anglais).

Les traitements hydrothermiques dans lesquels l'action de la chaleur se conjugue à celle d'une hydratation externe sous forme d'eau ou de vapeur à pression réduite. Leur efficacité peut être accrue par l'addition de sucres réducteurs, apportés par trempage. Dans la littérature, la méthode de référence est souvent l'autoclavage mais, à notre connaissance, ce procédé est peu pratiqué au plan industriel. Son efficacité a été testée au niveau de l'étape de désolvantation dans un désolvanteur - toaster, par injection de vapeur vive et chauffage, la température variant entre 105 et 120°C.

L'extrusion (ou cuisson-extrusion), processus complexe au cours duquel l'aliment perd complètement sa structure particulaire et subit des modifications profondes de ses caractéristiques physico-chimiques. Il consiste à soumettre aux effets conjugués de la pression (jusqu'à 200 bars) et de la température (90 à 250°C), durant un temps très court (inférieur à 30 secondes), une matière première ou un mélange, hydraté ou non, et à les mettre en forme par passage forcé au travers d'une filière.

La chaleur est responsable de modifications biochimiques des substrats organiques (fibres, amidon, protéines, lipides), et son effet s'accroît avec la température, la durée d'application, la présence d'eau et les traitements mécaniques souvent associés. Des liaisons se produisent entre le groupement amine libre des protéines (celui de la lysine est le plus réactif) et les sucres réducteurs : c'est la réaction de Maillard, dont la première étape conduit à la formation de bases de Schiff et est réversible sous l'action du faible pH dans la caillette et le début de l'intestin. Cette liaison est plus résistante à l'hydrolyse que la liaison peptidique, ce qui diminue la dégradabilité ruminale. La présence d'eau sans excès facilite ces modifications. Des interactions non covalentes se créent, de même que des liaisons (peptidiques ou ponts disulfures) dans et entre les chaînes protéiques. Une nouvelle organisation tridimensionnelle apparaît, avec une solubilité diminuée et une accessibilité aux enzymes bactériennes réduite (Alonso *et al.*, 2000).

L'humidification préalable de l'aliment (17-20% d'humidité) rend le traitement thermique plus efficace sur les protéines. L'eau réduit la viscosité de la masse, favorise les liaisons entre molécules en facilitant le rapprochement de leurs sites réactifs. Elle facilite aussi la diffusion de la chaleur. Enfin, sa vaporisation sous l'effet de variations brusques de pression ou de température est à l'origine de la structure vacuolaire très "aérée", caractéristique de certains traitements (expansion, extrusion). L'addition de sucres réducteurs, en particulier de xylose, présent dans les lignosulfites, sous-produit de l'industrie papetière, accroît l'efficacité du traitement (Wallace et Falconer, 1992).

En cas de température trop élevée ou de chauffage prolongé, des liaisons irréversibles de polymérisation se produisent, rendant les acides aminés partiellement indisponibles pour l'absorption intestinale. Différents tests, notamment celui de la lysine disponible et l'indice de disponibilité des protéines (Hsu et Satter, 1995),

renseignent sur la qualité du traitement thermique. Par ailleurs, le chauffage, surtout en présence d'eau, favorise la dégradation ruminale de l'amidon (Walhain *et al.*, 1992 ; Poncet *et al.*, 1995) mais serait sans effet sur la fraction non protéique et non amylacée des graines (Yu *et al.*, 2002). Quant aux lipides, ils sont oxydés lorsque la température est trop élevée (130°C semble être un maximum), mais pourraient être très partiellement protégés de l'hydrogénation par le chauffage du fait de la résistance acquise par les protéines qui les entourent. Enfin, les traitements par la chaleur contribuent à inactiver des microorganismes pathogènes, des enzymes et certains facteurs antinutritionnels ou composés toxiques thermosensibles.

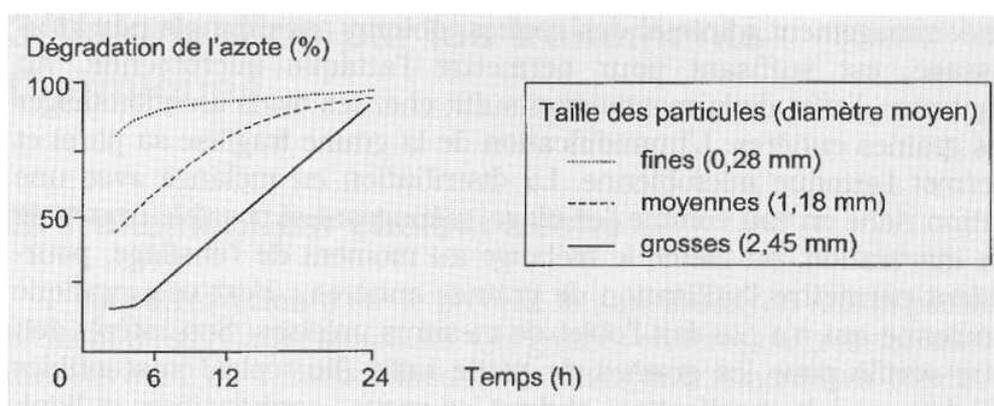
Les traitements chimiques mettent en jeu l'action d'un composé qui se fixe plus ou moins spécifiquement aux protéines et les protègent des dégradations ruminales. La méthode la plus utilisée emploie le formaldéhyde qui, à doses réduites (0,3-0,5% des protéines), entraîne dans un premier temps la formation de composés hydroxyméthylés et des bases de Schiff, sans effet sur la digestibilité intestinale en raison d'une rupture des liaisons au niveau de la caillette. Le traitement au formol protège aussi l'amidon des graines (Michalet-Doreau *et al.*, 1997) et les lipides ; pour ces derniers, le traitement au formol est actuellement le seul moyen connu de limiter fortement l'hydrogénation ruminale des acides gras polyinsaturés (Doreau *et al.*, 1997) et donc de les retrouver dans le lait (Kennelly, 1996). L'utilisation de tanins exogènes, basée sur le même principe, est une voie encore mal explorée en raison de l'efficacité du traitement au formol. Ses conditions d'emploi (nature des tanins, fixation optimale sur les protéines) sont mal maîtrisées (Zimmer et Cordesse, 1996) mais font l'objet de recherches actuelles. D'autres traitements chimiques moins connus ont été testés et ont une efficacité variable : les bentonites, les alcools, l'hydroxyde de sodium, des cations divalents tels le zinc (Cleale *et al.*, 1987). Ces méthodes changent la structure des protéines et diminuent le nombre de liaisons peptidiques accessibles aux protéases bactériennes.

2. Effets des traitements mécaniques

La réduction de taille des particules alimentaires accroît leur dégradabilité dans le rumen en accélérant la vitesse d'hydratation, la solubilisation et la dégradation par les microorganismes. Elle est toutefois partiellement compensée par une sortie plus rapide du rumen sous forme non dégradée, ce qui a été montré par Ewing *et al.* (1986) sur des tourteaux, et par Freer et Dove (1984) sur du lupin. Ces effets sont rarement pris en compte dans les essais *in sacco* visant à évaluer la DT_N. Le plus souvent, les aliments sont introduits dans les sachets broyés à une grille standard de 0,8 mm. L'accroissement de la taille des particules du lupin (grilles de 1 à 5 mm) a pourtant fortement réduit la DT_N (de 95 à 62%) de cette graine, tout en augmentant la digestibilité intestinale (Kibelolaud *et al.*, 1991) ; des résultats similaires ont été obtenus par Freer et Dove (1984, figure 1). Inversement, il n'y a pas eu d'effet de la granulométrie sur la DT_N du pois (Petit *et al.*, 1997). Cette différence pourrait être due à une interaction avec la nature des glucides de réserve, β-galactanes pour le lupin et amidon pour le pois.

Figure 1 : Effet de la taille des particules sur la dégradation *in sacco* du lupin (d'après Freer et Dove, 1984).

Figure 1 : Effect of particle size on the in sacco degradation of lupin (after Freer and Dove, 1984).



Ces résultats *in sacco* ne permettent pas d'évaluer la réponse *in vivo*; la relation entre les deux nécessite des expérimentations spécifiques qui jusqu'à présent n'ont été établies que pour le maïs (Nozière *et al.*, 2003) mais ne peuvent être étendues aux autres graines et aux tourteaux. D'après Tice *et al.* (1993), l'augmentation de la taille des particules de la graine de soja torréfiée, de 0,6 à plus de 4,7 mm de diamètre moyen, ne modifie pas la digestibilité de la ration, mais accroît *in vivo* la part de N *by-pass* de la graine de soja de 29 à 48%. D'autres essais ont montré que l'utilisation de graines de soja entières ou grossièrement divisées à raison de 18 à 35% de la ration n'a pas modifié (Dhiman *et al.*, 1997) ou a amélioré (Scott *et al.*, 1991) la digestibilité de la ration et en particulier de l'azote. Les résultats de production laitière (Dhiman *et al.*, 1997) confirment les bilans digestifs duodénaux (Tice *et al.*, 1993). La torréfaction de la graine de soja permet un accroissement de la production de lait, à même forme de présentation de la graine (taille moyenne > 4,75 mm). En réduisant la granulométrie de la graine torréfiée (taille moyenne > 4,75 mm à 1,59 mm) la production laitière passe par un maximum (taille moyenne 2,92 mm) puis diminue pour rejoindre celle observée avec la graine grossière (> 4,75 mm) non torréfiée. Ceci montre qu'il existe un optimum granulométrique et que l'on peut, en accord avec Tice *et al.* (1993), annuler l'effet positif de la torréfaction en broyant la graine torréfiée, même grossièrement (grille de 0,9 cm). La distribution de graines de colza entières est par contre à déconseiller chez la vache laitière, car elle réduit fortement la digestibilité (Doreau et Michalet-Doreau, 1987). Un endommagement minimal des coques, obtenu par exemple par aplatisage, est suffisant pour permettre l'attaque microbienne. Au contraire, l'effet de la mastication suffit chez les ovins à endommager les graines entières. L'humidification de la graine fragilise sa paroi et permet l'attaque microbienne. La distribution en mélange avec une ration riche en eau comme l'ensilage, ménageant si possible un temps de macération, ou même le mélange au moment de l'ensilage, pourraient permettre l'utilisation de graines entières; c'est une pratique ancienne qui n'a pas fait l'objet de mesures précises. Son intérêt doit être vérifié pour les graines de petite taille (lin, colza) susceptibles d'échapper à la mastication, et dont les coques sont épaisses et lignifiées.

Il y a eu peu de comparaisons directes entre protéagineux entiers, concassés ou finement broyés. Toutefois, des graines de soja grossièrement divisées, du lupin grossièrement broyé (grille de 3,8 cm) et du pois plus finement broyé se sont parfaitement substitués à du tourteau de soja chez des vaches fortes productrices en début de lactation (Petit *et al.*, 1997; Faldet et Satter, 1991, entre autres). Ces résultats confortent les nombreux essais menés en particulier en France dans les années 70 et 80. Tisserand (1977), Hoden (1982), Huguet *et al.* (1983), entre autres, avaient utilisé des protéagineux (lupin, pois, féverole) comme unique source azotée ou avec un correcteur azoté du fourrage, dans des rations à base d'ensilage de maïs ou de pulpes de betteraves distribuées à des ovins et bovins en croissance, ou à des vaches laitières à 6 500 l de lait environ. Ces graines, grossièrement broyées ou entières, se substituaient sans modification de performances au tourteau de soja, en particulier le lupin du fait de sa teneur en azote élevée.

Les acides gras polyinsaturés contenus dans les graines oléagineuses sont très fortement hydrogénés dans le rumen, de sorte que très peu sont absorbés au niveau intestinal. Toutefois, le fait d'apporter les graines sous forme grossièrement broyée constitue une protection partielle naturelle qui retarde l'hydrogénation, et peut accroître la part d'acides gras polyinsaturés dans le lait, en comparaison à une distribution sous forme d'huile et de tourteau : respectivement 4,7 contre 2,8% (Mohamed *et al.*, 1988). Par ailleurs, la présentation sous forme de graine modifie moins le profil des acides gras volatils, qui tend à un accroissement de l'acide propionique dans le cas de distribution de l'huile sous forme libre (Jouany *et al.*, 2000). L'étalement de la consommation des graines dans le temps, comme avec des rations en mélange, réduit encore les modifications du profil d'acides gras volatils et préserve l'apport d'acides gras polyinsaturés dans le lait (Banks *et al.*, 1980). Les graines oléagineuses réduisent moins le taux butyreux du lait (-0,9 g/kg) que les huiles correspondantes (-2,8 g/kg) (Chilliard *et al.*, 2001). Ceci est dû au fait que la libération progressive des lipides dans le milieu ruminal entraîne une production moindre d'acides gras *trans*, intermédiaires de l'hydrogénation ruminale, et responsables de la chute de taux butyreux dans le lait. Toutefois, ces acides gras *trans* sont les principaux précurseurs de l'acide linoléique conjugué (CLA) dont les propriétés anticancéreuses sont à l'étude, et l'accroissement de leur concentration pourrait être recherché.

3. Valorisation par les traitements thermiques

* Traitement par chaleur sèche

La torréfaction a été le procédé le plus étudié en raison probablement de sa relative simplicité. Les graines entières ou grossièrement divisées (en 2 ou 4 fractions) sont chauffées directement (par conduction, convection et rayonnement) dans un tambour où elles sont brassées. La température du produit à la sortie du tambour (105

à 165°C dans les différents essais analysés) et la durée de stockage ou "maturation" des produits à température élevée (de 20 à 30°C en dessous de la température de sortie) sont les deux paramètres importants du traitement. Le temps de séjour dans le tambour est rarement indiqué (de l'ordre de 1 à 10 mm) ; le temps de maturation varie de 0,5 à 3 h. La torréfaction offre l'avantage de peu modifier la granulométrie et l'intégrité des tissus de la graine, et donc de cumuler les avantages d'une "auto-protection" des constituants des graines entières ou peu divisées (solubilité de l'azote et accessibilité aux enzymes microbiens réduites) et la résistance acquise lors du traitement par insolubilisation des protéines.

La dégradabilité ruminale des protéines diminue avec l'intensité du chauffage et/ou sa durée, mais ces relations ne sont pas linéaires. Parallèlement, la digestibilité intestinale des protéines augmente puis diminue lorsque la température augmente. Comme pour tous les traitements à la chaleur, les conditions optimales sont celles qui maximisent la fraction des AA de l'aliment traité qui est absorbée dans l'intestin grêle (et non celles qui maximisent la protection ruminale) (Demjanec et al., 1995).

Les conditions optimales relevées dans la littérature sont différentes entre aliments mais aussi pour un même aliment, en raison de la diversité des conditions de traitement (ex. granulométrie) et des méthodes d'estimation de l'optimum (dégradabilité *in vitro* ou *in situ*, ou mesure de lysine disponible intestinale...) : 150°C – 45 minutes pour le lupin et la féverole (Yu et al., 1999) ; 120°C – 35 min pour lupin, féverole et tourteau de colza (Moss et al., 2000) et 125°C – 10 min pour le tourteau de colza (McKinnon et al., 1995) ; 145°C – 30 min pour la graine de soja (Faldet et al., 1991), 165°C - 150 min pour le tourteau de soja (Demjanec et al., 1995) et enfin 120°C – 30 min pour la graine de lin (Petit et al., 2002). Des températures de torréfaction (105 à 115°C pour le lupin), avec ou sans maturation à température élevée, ont également été utilisées et ont parfois donné de bons résultats, mais la granulométrie très grossière du produit traité ayant servi au test de dégradabilité *in sacco* a pu interférer positivement (Robinson et McNiven, 1993 ; Singh et al., 1995). Dans les conditions optimales (figure 2a), la proportion de N by-pass est en moyenne doublée : de 25 à 49% pour la graine de soja (Tice et al., 1993) ; 35 à 61% pour le tourteau de soja (Demjanec et al., 1995) ; 7 à 33% pour le lupin (Robinson et McNiven, 1993). La digestibilité réelle dans l'intestin de N by-pass augmente, passant de 80 – 85% à 90 – 95%.

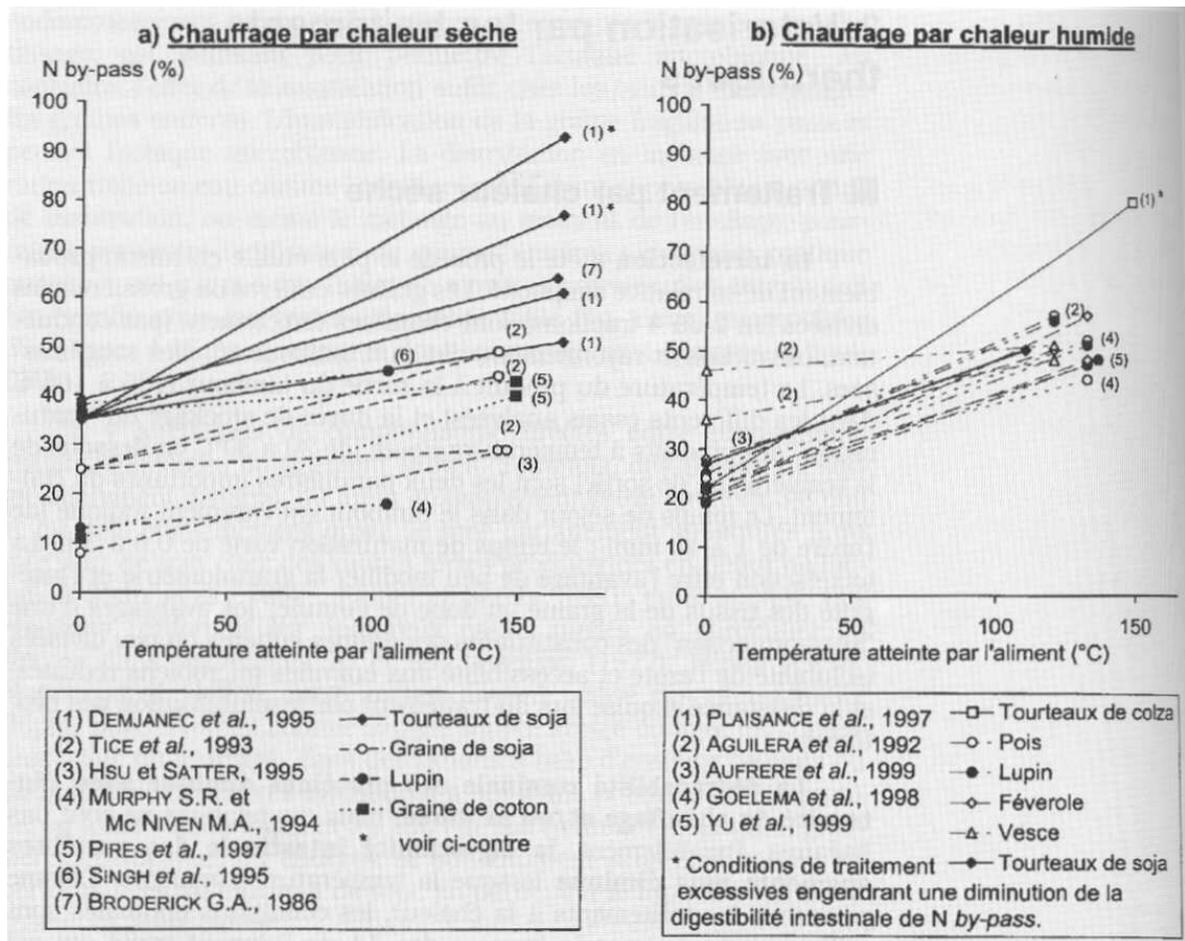
Le traitement par infranisation - chauffage par rayonnement infrarouge appliqué pendant une courte durée (1 à 2 min) pour atteindre la température recherchée, puis maturation à la même température pendant 30 à 120 minutes avant refroidissement - n'a pas fait l'objet d'un nombre suffisant d'essais dans ce domaine d'application pour permettre des généralisations et parler d'optimisation. La proportion d'azote by-pass, après 16 h d'incubation *in sacco* dans le rumen, de la graine de soja grossièrement aplatie portée à 130°C et maintenue à cette température dans un four conventionnel pendant 30 min, augmente de 60% à 85% (Petit et al., 1999). Pour la graine de lin grossièrement aplatie, il faut atteindre 150°C maintenus pendant 1 h pour accroître la part d'azote by-pass (mesurée *in vitro*) de 38 à 52%, sans altérer la digestibilité *in vitro* de la matière sèche de la graine (Petit et al., 2002). Appliqué à la graine de colza broyée à 1,25 mm, un chauffage de 90 secondes à 110-115°C n'a fait passer la part de N by-pass que de 8% à 14% (Wang et al., 1999).

Dans le cas des graines oléagineuses, les risques d'interaction négative des lipides sur la digestion ruminale et les conséquences sur la production de lait et le taux butyreux disparaissent, par un effet de protection des lipides qui renforce celui induit par l'utilisation de graines grossièrement éclatées. D'ailleurs, le bénéfice du chauffage est perdu si l'on broie la graine trop finement (Dhiman et al., 1997). Les performances laitières, excepté le taux protéique, remontent par rapport au témoin non traité et atteignent parfois celles observées avec le tourteau de soja pris comme référence (Faldet et Satter, 1991 ; Mohamed et al., 1988 ; Dhiman et al., 1997 ; Scott et al., 1991). La composition des AG du lait est également améliorée dans le sens d'un accroissement de la proportion des AG insaturés (Robinson et McNiven, 1993 ; Singh et al., 1995). Cependant, Petit et al. (2002) n'observent pas *in vitro* de protection des lipides de la graine de lin sous l'effet du chauffage par infranisation ou dans un four à convection.

Le traitement par la chaleur sèche est la première étape du procédé classique d'extraction de l'huile des graines oléagineuses riches en huile ; les graines sont normalement chauffées entre 70 et 100°C selon le type de graine pendant 30 min après aplatissage, pour améliorer l'efficacité de l'extraction de l'huile par pression. Des essais ont montré qu'en augmentant cette température jusqu'à 130°C (Evrard et al., 1996), la dégradabilité ruminale des protéines du tourteau de colza chutait entre 120° et 130°C (76% à 48%), la digestibilité intestinale *in sacco* passait de 85 à 80% et finalement la proportion de protéines digestibles dans l'intestin grêle passait de 20 à 40%. Titgemeyer et Shirley (1997) montrent qu'une précuisson à 146°C des graines de soja a l'effet optimal sur la valeur azotée du tourteau.

Figure 2 : Effet d'un traitement thermique (chauffage par chaleur sèche ou humide) appliqué à différents oléoprotéagineux (graines ou tourteaux) sur la part d'azote qui échappe aux dégradations ruminales (*N by-pass*).

*Figure 2 : Effect of a thermal treatment (wet or dry heating) applied to various oil-seed and high-protein crops (seeds or cakes) on the proportion of nitrogen escaping ruminal degradations (*N by-pass*). Temperatures shown on the x-axis are those attained by the feed during the treatment. Asterisks refer to excess conditions (temperature, length of treatment) that diminish the intestinal digestibility of *N by-pass*.*



* Traitement par chaleur humide

Nous placerons dans cette catégorie le procédé d'autoclavage (*pressure toasting* en anglais), le chauffage au four à convection ou en autoclave de graines ou tourteaux ayant été préalablement humidifiés (17-20%) avec ajout ou non de sucres réducteurs (fructose, mélasse, lignosulfite), ainsi que le procédé d'injection de vapeur vive et de chauffage au cours de l'étape de désolvantation précédant la sortie d'un tourteau du désolvant - toasteur.

Pour les raisons évoquées plus haut, les traitements thermiques sont plus efficaces par voie humide, sans que l'on puisse, à partir des résultats disponibles, établir de loi entre humidité des produits, température, et diminution de dégradabilité. Cette meilleure efficacité du traitement, qui se traduit par une intensité de chauffage moindre ou une durée plus courte de chauffage (et une diminution du coût de traitement), pour atteindre le même résultat concernant l'abaissement de la dégradabilité de l'azote a été clairement mis en évidence (figure 2b). Un survol des résultats disponibles montre que, pour doubler la part d'azote *by-pass* de différentes sources azotées, la température de chauffage par voie humide varie entre 105 et 136°C pour une durée du chauffage variant entre 10 et 15 min. Aguilera *et al.* (1992) montrent des différences importantes de

réponse selon l'aliment ; un autoclavage à 120°C pendant 30 min double l'azote *by-pass* du pois et du lupin ; la réponse est sensiblement plus faible avec la féverole, alors qu'elle n'est pas significative avec la vesce. Plaisance *et al.* (1997) constatent que le chauffage à 150°C pendant 105 min d'un tourteau de colza à 20% d'humidité est excessif ; il multiplie par 4 la part de N *by-pass* (80,2 vs 21,5%) mais il diminue la digestibilité fécale de l'azote (57 vs 73%). L'autoclavage (132°C - 3 min) du pois, du lupin et de la féverole accroît dans une proportion de 2 à 3 fois la part de N *by-pass* (20 - 24% à 52 - 57%) sans altérer la digestibilité intestinale de l'azote qui est élevée et tend à augmenter sous l'effet du traitement, de 96% à 98% (Goelema *et al.*, 1998). Yu *et al.* (1999) montrent que les conditions optimales pour la graine de lupin s'établissent à 136°C pendant 15 min, la digestibilité intestinale *in sacco* de l'azote échappant à la dégradation étant alors de 88%. L'autoclavage du tourteau de soja à 105-110°C et 2 bars pendant 15 min (en présence de 0,1% de formol) a augmenté de 27,3% à 49,8% la part de N *by-pass* sans modifier la part d'azote dans le résidu NDF de l'aliment traité (Aufrère *et al.*, 1999). La digestibilité intestinale de N *by-pass* semble peu modifiée par le chauffage en présence d'eau.

Le chauffage (105-110°C) ainsi que l'injection de vapeur à des débits variables au cours de l'étape de désolvantation du procédé d'extraction d'huile se sont avérés d'une grande efficacité pour accroître la part de N *by-pass* d'un tourteau de colza (Aufrère *et al.*, 1998). Petit *et al.* (2002) montrent enfin que l'autoclave est plus efficace qu'un chauffage au four à convection pour réduire la dégradabilité de l'azote de la graine de lin préalablement humidifiée et altère moins la digestibilité *in vitro* de la matière sèche de la graine et le profil d'acides gras. En outre, ces auteurs montrent qu'un traitement de faible intensité (100°C, 30 min) protège les acides gras polyinsaturés de la biohydrogénation davantage que les traitements plus sévères en chaleur sèche avec ou sans addition de sucre.

L'effet du chauffage est amplifié si la graine grossièrement éclatée est enrichie en sucres réducteurs (figure 3a) par trempage dans une solution contenant ce sucre, avant ou pendant le chauffage (four à chaleur forcée ou infrarouge). Différents sucres ont été utilisés (fructose, mélasse, xylose apporté par une solution de lignosulfite). Les effets diffèrent selon les sucres (Wallace et Falconer, 1992), le xylose étant le plus efficace. Ce procédé, bien qu'utilisant la chaleur " sèche ", diffère du toastage dans la mesure où sont associés les effets positifs de l'eau imbibant la graine et d'un sucre sur la protection des protéines. Ainsi, l'élévation de température lors de l'agglomération d'un tourteau de soja additionné de 4 ou 8% de lignosulfite a suffi à augmenter la fraction de N *by-pass* à 31% et 42% respectivement pour une valeur témoin de 24% (Stern, 1984). Les essais effectués sur du tourteau de soja (Nakamura *et al.*, 1992) et de colza (Stanford *et al.*, 1995), de la graine de soja (Petit *et al.*, 1999), de lin (Petit *et al.*, 2002) et de colza (Von Keyserlingk *et al.*, 2000), chauffés ou autoclavés après humidification (17-20% d'eau) et enrichissement en xylose font état de températures optimales variant entre 93 et 100°C, pendant des durées de 30 à 60 min. Là encore, dans ces conditions, la part de N *by-pass* est doublée. Enfin, l'autoclavage (100°C, 15 min) est un procédé très efficace pour inhiber l'activité des facteurs antinutritionnels.

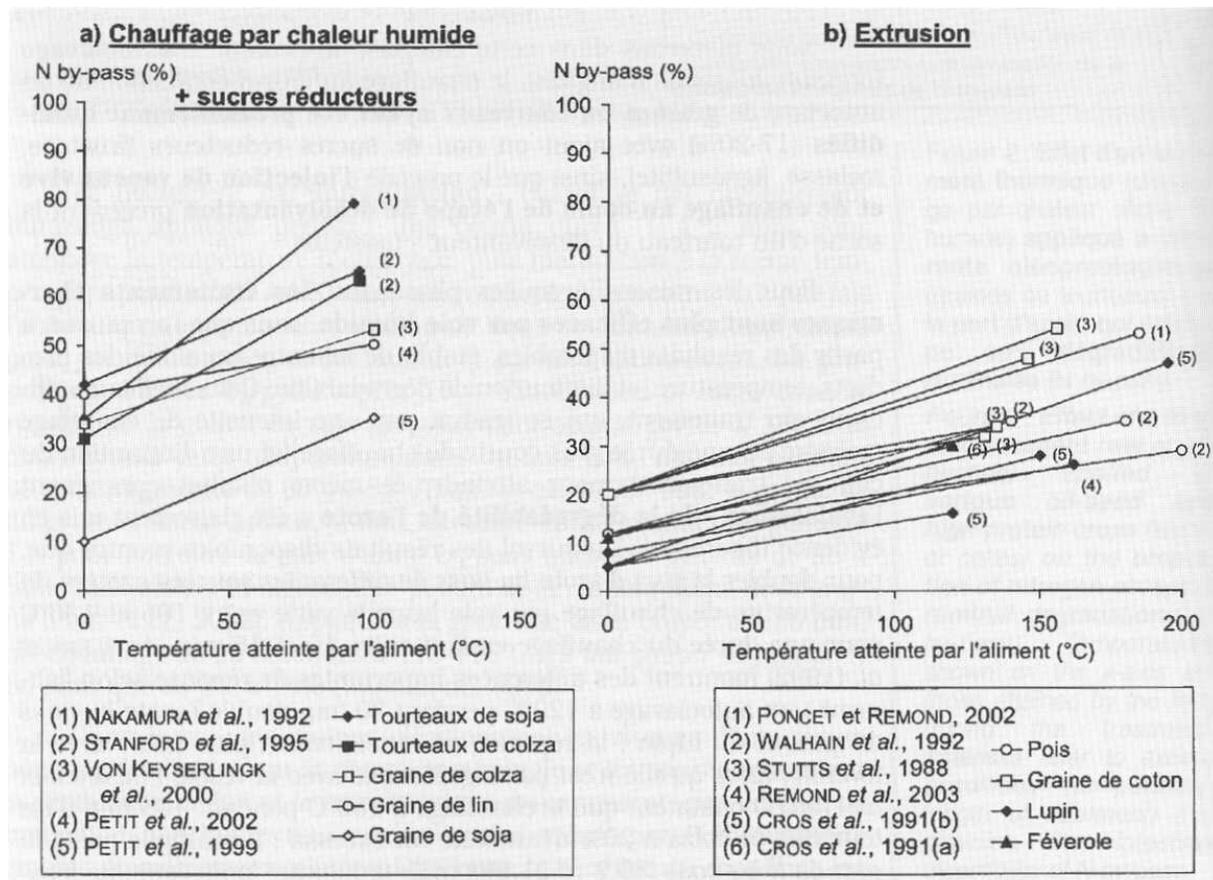
* Traitement par extrusion (ou cuisson – extrusion)

La principale différence par rapport aux traitements précédents réside dans le fait que l'échauffement du produit est généré principalement par cisaillement, malaxage, friction, pression. Il en résulte une rupture des tissus et des cellules. En outre, l'expansion en sortie de filière est responsable de la structure alvéolaire, très homogène, des produits extrudés. Leurs constituants sont très rapidement exposés aux agents digestifs extérieurs. Le procédé est techniquement complexe et ses effets sont parfois aléatoires, car l'échauffement dépend de nombreux paramètres parfois difficiles à maîtriser et à optimiser. Ils ne sont généralement pas précisés dans la littérature. Les graines riches en huile ne s'échauffent pas suffisamment et doivent être associées à une céréale ou une légumineuse riche en amidon (Melcion, 1987) ou à des matières premières absorbantes comme le son. Le traitement peut être précédé d'une étape de cuisson. De la chaleur et de l'eau peuvent également être injectées dans l'extrudeur.

La solubilité et la dégradabilité des protéines dans le rumen sont fortement réduites (figure 3b). L'effet de protection au niveau ruminal augmente avec la température d'extrusion. Un optimum apparaît vers 150°C, les températures supérieures (195, voire 220°C) ayant un effet marginal sur la DT_N du pois (Walhain *et al.*, 1992) ou un effet négatif sur la dégradabilité de la matière sèche et des glucides pariétaux du lupin (Cros *et al.*, 1991a ; Kibelolaud *et al.*, 1993). Entre l'aliment témoin et celui extrudé, la DT_N passe de 93-95% à 65-72% (150°C) et 53-62% (195°C) dans le cas du lupin (Cros *et al.*, 1991a ; Kibelolaud *et al.*, 1993) ; la protection serait supérieure pour les AA, et plus particulièrement pour les AA essentiels (DT_N diminuant de 95

Figure 3 : Effet d'un traitement thermique (chauffage par chaleur humide avec addition de sucres réducteurs ou extrusion) appliqué à différents oléoprotéagineux (graines ou tourteaux) sur la part d'azote qui échappe aux dégradations ruminales (*N* by-pass).

*Figure 3 : Effect of a thermal treatment (wet heating with addition of reducing carbohydrates or extrusion) applied to various oil-seed and high-protein crops (seeds or cakes) on the proportion of nitrogen escaping ruminal degradations (*N* by-pass).*



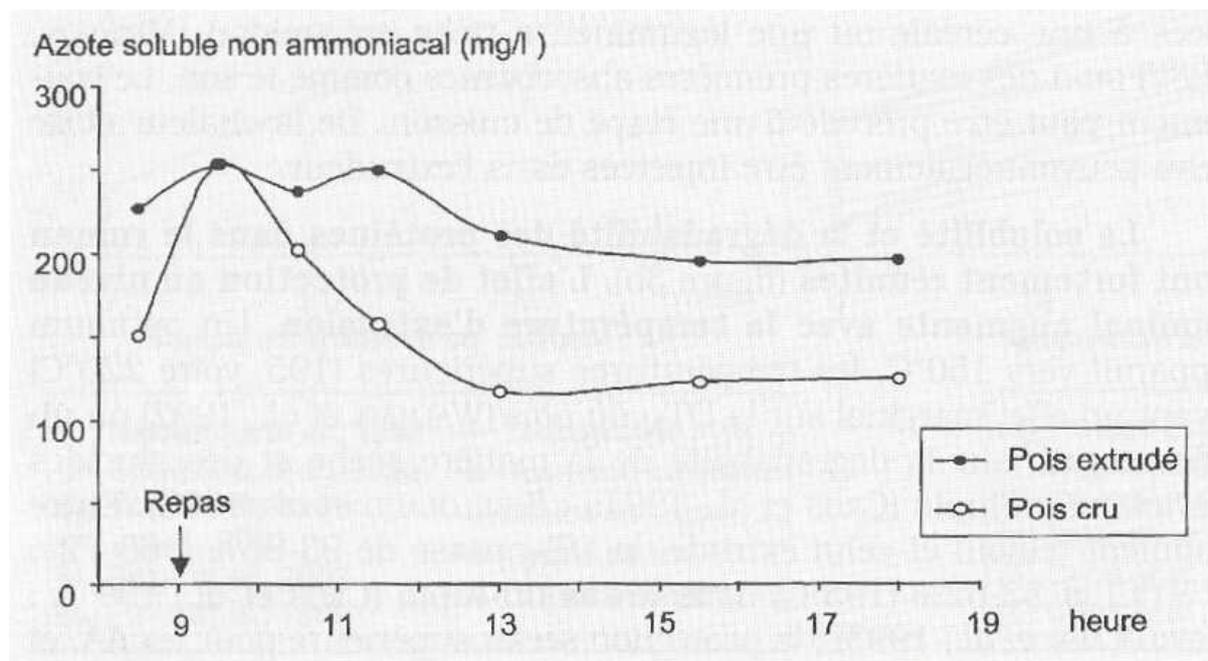
à 37% à 195°C ; Benchaar et Moncoulon, 1993). Des effets similaires ont été rapportés par Aufrère *et al.* (2001) et Rémond *et al.* (2003) avec du lupin extrudé à 162°C. Des températures inférieures se sont avérées inefficaces (Deacon *et al.*, 1988, pour des graines de colza et de soja ; Clinquart *et al.*, 1993, pour des graines de soja extrudées à 140°C ; Ferlay *et al.*, 1992, pour des graines de colza extrudées à 143°C). Orias *et al.* (2002) n'observent pas d'effet de l'extrusion de graines de soja sur le flux d'azote duodénal alimentaire pour des températures de 116, 138 et 160°C. Cros *et al.* (1991b) observent cependant une diminution de 89% à 70% de la DT_N de l'azote de la féverole par extrusion à 120°C. Il est probable que la teneur en lipides des graines oléagineuses rende les effets de l'extrusion plus aléatoire. L'extrusion de mélanges avec un aliment contenant de l'amidon ou avec une charge inerte au plan alimentaire (bentonite, lignosulfite) mais qui favorise à la fois l'échauffement et l'insolubilisation des protéines, améliore l'efficacité du traitement : diminution des DT_N de 88 à 74% et de 85 à 67% pour des mélanges pois + graine de colza 80/20 et 60/40, extrudés à 145 et 165°C respectivement, sans changement significatif de la dégradabilité des autres constituants (Chapoutot et Sauvant, 1997) ; diminution de 80 à 65% de la DT_N d'un mélange graines de lin + orge (50/50) extrudé à 160°C, mais pas d'effet pour un mélange pois + graine de colza (80/20) extrudé à 140°C (Clinquart *et al.*, 1993).

Le flux d'azote alimentaire duodénal est accru, dans le cas des protéagineux, dans des proportions variables selon la part de l'azote alimentaire dans l'azote total de la ration et l'efficacité du traitement. Le flux d'azote microbien a augmenté (Benchaar *et al.*, 1992 ; Poncet et Rémond, 2002), est resté stable (Orias *et al.*, 2002) ou a

diminué (Rémond *et al.*, 2003). Les variations du flux de protéines microbiennes sous l'effet de l'extrusion de la source azotée de la ration ne sont pas faciles à interpréter. L'augmentation du flux d'azote microbien observé par Poncet et Rémond (2002) en réponse à l'extrusion (185°C) du pois peut s'expliquer par un ralentissement de la vitesse de dégradation des protéines du pois et la disponibilité plus régulière dans le liquide du rumen des produits de la protéolyse nécessaires à la synthèse protéique microbienne (figure 4).

Figure 4 : Effet de l'extrusion du pois sur la teneur en azote soluble non ammoniacal du rumen (Poncet et Rémond, 2002).

Figure 4 : Effect of the extrusion of pea seeds on the content of non-ammonia soluble nitrogen in the rumen (Poncet et Rémond, 2002).



Les variations du flux de protéines microbiennes en réponse à une réduction de la vitesse de dégradation des protéines alimentaires dans le rumen ne sont pas spécifiques au traitement par extrusion mais s'observent quel que soit le procédé utilisé. La diminution du flux de protéines microbiennes est parfois non significative mais suffisante pour faire en sorte que l'augmentation du flux d'azote non ammoniacal duodénal ne soit pas significative elle aussi. Un manque d'ammoniaque est souvent mis en cause, mais les teneurs moyennes dans le rumen ne descendent pas en dessous de 100 mg N-NH₃/l. Par ailleurs, le ralentissement de la protéolyse est plutôt un phénomène favorable. En revanche, un traitement trop sévère peut diminuer la dégradabilité des constituants non azotés de l'aliment traité et induire une moindre disponibilité en énergie pour les microbes.

La réduction de la dégradation ruminale des protéines sous l'effet de l'extrusion s'accompagne comme pour les autres traitements d'une augmentation de la digestibilité des protéines alimentaires dans l'intestin grêle (dr). Celle-ci a été montrée *in vivo* pour le pois (dr passant de 80 à 95%, Focant *et al.*, 1990 ; de 91 à 98%, Poncet et Rémond, 2002) et le lupin (dr augmentant de 80 à 97%, Rémond *et al.*, 2003). Cet accroissement ne s'explique que partiellement par une part plus faible de l'azote microbien ou endogène, tous deux moins digestibles que l'azote alimentaire. En effet, les mesures *in sacco* vont dans le même sens. Elles montrent en outre que cet accroissement s'observe déjà à des températures voisines de 110-140°C, et ne s'amplifie que très peu lorsque la température d'extrusion est plus élevée (Cros *et al.*, 1991a et b ; Walhain *et al.*, 1992 ; Kibelolaud *et al.*, 1993).

La valeur PDIE des protéagineux extrudés à des températures de 180 à 195°C, estimée à partir de bilans duodénaux, est proche de celle des tables INRA-AFZ (2002) pour le lupin (Benchaar *et al.*, 1991 ; Rémond *et al.*, 2003) et la féverole (Benchaar *et al.*, 1992) mais beaucoup plus élevée pour le pois : 199 contre 116 g/kg (Poncet et Rémond, 2002).

Généralement, l'extrusion augmente fortement la dégradabilité ruminale de l'amidon mesurée *in sacco*, par exemple pour le pois extrudé à 140°C (Walhain *et al.*, 1992 ; Petit *et al.*, 1997). Ce résultat confirme les nombreuses données obtenues avec des céréales. En revanche, Chapoutot et Sauvart (1997) n'ont pas observé de variation de dégradation ruminale de l'amidon après extrusion d'un mélange pois + graine de colza. Cette divergence s'observe aussi *in vivo*, puisque la digestibilité ruminale de la féverole est accrue selon Benchaar *et al.* (1992) mais celle du pois ne l'est pas d'après Focant *et al.* (1990), et Poncet et Rémond (non publié). Selon Goelma *et al.* (1998), la gélatinisation de l'amidon lors du chauffage, qui entraîne l'accroissement de sa dégradabilité ruminale, pourrait parfois être suivie d'une recristallisation (rétrogradation) lors du refroidissement, qui aurait l'effet inverse. Cette hypothèse demande toutefois à être vérifiée. La digestibilité totale de l'amidon ne semble toutefois pas affectée par l'extrusion dans les essais mentionnés ci-dessus.

L'effet de l'extrusion sur les lipides est très différent de l'effet sur l'azote. L'extrusion réduit l'effet partiellement protecteur de la graine sur la libération des lipides, du fait de la destruction de la structure cellulaire. Le comportement des lipides des graines extrudées est donc probablement intermédiaire entre ceux des graines crues et ceux des huiles extraites des graines, ce qui fait qu'on peut s'attendre, par rapport à la graine crue, à un effet plus négatif sur le taux butyreux du lait, à une teneur en acides gras polyinsaturés dans le lait ou le muscle plus faible, mais à une teneur en acide linoléique conjugué (CLA) plus élevée. De même, selon Shaver (1999), l'accessibilité de l'huile de la graine constitue une différence d'importance majeure entre la graine entière toastée et la graine extrudée. Différents résultats obtenus *in vitro* confirment cette tendance. *In vivo*, les quelques comparaisons directes entre graines crues et extrudées ont montré des différences quantitativement limitées, même lorsqu'elles sont significatives, sur les phénomènes digestifs (Ferlay *et al.*, 1992), sur le taux butyreux du lait (-2 g/kg pour Faldet et Satter, 1991 et Shaver, 1999) ou sur la composition des lipides du lait (Chouinard *et al.*, 2001) ou de la viande.

Il est sûr que l'extrusion des oléoprotéagineux interfère davantage avec la digestion de la matière organique dans le rumen que les autres traitements thermiques soit par l'augmentation de la dégradabilité de l'amidon, soit par une moindre efficacité de la digestion des glucides pariétaux (Kibelolaud *et al.*, 1993), associée ou non à la plus grande accessibilité des lipides dans le cas des oléagineux, ou à une désynchronisation entre la vitesse de mise à disposition des sources d'énergie et d'azote pour la synthèse des protéines microbiennes.

Conclusion

Dans un contexte économique où la production maximale n'est plus l'unique objectif, l'utilisation des protéagineux et oléagineux " métropolitains " se développe naturellement. En témoignent les nombreuses expériences de producteurs laitiers satisfaits aux plans technique et économique d'avoir réduit leur dépendance du tourteau de soja, en diversifiant leurs ressources protéiques par une production à la ferme ou locale. La recherche doit aider ce changement en proposant des solutions d'abord pour améliorer la production de ces substituts au tourteau de soja, surtout celle des protéagineux, et ensuite pour optimiser leur valeur nutritive (azotée principalement) pour les ruminants, en privilégiant les solutions simples et peu coûteuses.

En exploitant la variabilité génétique existante, la sélection génétique classique offre des perspectives d'amélioration nombreuses, tant au niveau de la production des graines qu'au niveau de leur valeur azotée, qu'il faut évaluer rapidement.

L'expérience acquise sur l'effet des traitements technologiques thermiques, hydrothermiques et thermomécaniques (extrusion) est importante, surtout concernant la graine de soja. De nouvelles références sont nécessaires pour les protéagineux. Il est cependant difficile d'en tirer des conclusions sûres, relatives à l'intérêt respectif de chacun d'eux et aux conditions optimales de leur application. Rares sont les comparaisons faites simultanément sur un même aliment. En outre, les effets ont été testés le plus souvent par des méthodes *in vitro* ou *in sacco* qui ne peuvent être extrapolées aux conditions *in vivo* sans réserves.

L'extrusion est efficace pour protéger les protéines, surtout dans le cas des protéagineux. Toutefois, à la différence des autres procédés thermiques, il faut prendre en compte les effets sur l'utilisation des autres constituants, car le procédé détruit la structure des tissus et des cellules. Par exemple, en cas de rations riches en ces aliments, l'augmentation de la vitesse de dégradation de l'amidon, de même que la " libération " de l'huile, pourraient perturber le fonctionnement du rumen ; les effets qualitatifs de l'huile restent à préciser.

Curieusement, l'intérêt de distribuer des graines physiquement peu endommagées, aplaties très grossièrement, comme elles sont utilisées dans la pratique, ou entières et humides dans le cas d'une conservation par inertage, n'a pas été évalué en termes de valeur azotée (PDI), comparativement au broyage classique (0,8 à 3 mm). Peu coûteux et simples, ces traitements peuvent réduire la vitesse de solubilisation et de dégradation des constituants de la graine. C'est l'objectif recherché pour les protéines, mais aussi pour l'amidon quand il est rapidement dégradé. C'est peut-être une solution pour valoriser au mieux les qualités " santé " des lipides des graines oléagineuses sans risquer de perturber la digestion ruminale. Cependant, un traitement thermique peut éventuellement être nécessaire lorsque la graine contient des substances toxiques (cas du lin distribué en quantité importante).

La valeur azotée des tourteaux peut être accrue en adaptant le procédé industriel classique d'extraction de l'huile par une précuisson plus intense et un chauffage avec injection de vapeur après désolvantation. Ils peuvent aussi être traités ultérieurement par la chaleur, ou par tannage au formol tant que ce traitement efficace n'est pas interdit. Le procédé de protection des protéines dans le rumen par complexation avec des tanins exogènes a fait les preuves de son efficacité lors de tests *in vitro* ou *in sacco* mais, dans l'état actuel, son efficacité par simple addition de tanins à la ration est insuffisante.

Il est important de rappeler que l'intérêt d'un traitement dépend de son efficacité à valoriser les composants d'intérêt (protéines, amidon, lipides dans le cas des oléoprotéagineux) sans perturber par ailleurs la digestion ruminale et intestinale, mais aussi de son coût. Cette contrainte est particulièrement forte dans le cas des protéagineux.

Travail présenté aux Journées d'information de l'A.F.P.F.

"Fourrages, protéines et environnement : de nouveaux équilibres à construire",
les 27 et 28 mars 2003.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aguilera J.F., Bustos M., Molina E. (1992) : "The degradability of legume seed meals in the rumen : effect of heat treatment", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 36, 101-112.

Alonso R., Orue E., Zabalza M. J., Grant G., Marzo F. (2000): "Effect of extrusion cooking on structure and functional properties of pea and kidney bean proteins", *J. Sci. Food Agric.*, 80, 397-403.

Aufrère J., Graviou D., Demarquilly C., Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P. (1991): "Predicting in situ degradability of feed proteins in the rumen by two laboratory methods (solubility and enzymatic degradation)", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 33, 97-116.

Aufrère J., Graviou D., Demarquilly C. (1998): "The significance of the degradation products of rapeseed meal proteins in the rumen according to different meal processing techniques", *Ann. Zootech.*, 47, 127- 140

Aufrère J., Garces C., Graviou D., Hernando I., Demarquilly C. (1999) : "Degradation in the rumen of treated and untreated soya bean meal proteins", *Ann. Zootech.*, 48, 263-273.

Aufrère J., Graviou D., Melcion J. P., Demarquilly C. (2001): "Degradation in the rumen of lupin (*Lupinus albus* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) seed proteins. Effect of heat treatment", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 92, 215-236.

Banks W., Clapperton J. L., Kelly M. E., Wilson A. G., Crawford R. J. (1980): "The yield, fatty acid composition and physical properties of milk fat obtained by feeding soya oil to dairy cows", *J. Sci. Food Agric.*, 31, 368-374.

Benchaar C., Moncoulon R.. (1993) : "Effet de l'extrusion à 195°C sur la disparition des acides aminés du lupin dans le rumen et l'intestin in situ chez la vache", *Ann. Zootech.*, 42, 128-129.

Benchaar C., Bayourthe C., Moncoulon R., Vernay M. (1991) : "Digestion ruminale et absorption intestinale des protéines du lupin extrudé chez la vache laitière", *Reprod. Nutr. Dev.*, 31, 655-665.

Benchaar C., Vernay M., Bayourthe C., Moncoulon R (1992) : "Effect de l'extrusion de la féverole (*Vicia faba*) sur les flux intestinaux d'azote et d'amidon chez la vache laitière en production", *Reprod. Nutr. Dev.*, 32, 265-275.

Biarnès V., Rouillet G., Baril C. Ragonnaud G. (2002): "Rendement et teneur en protéines du pois protéagineux. Mieux comprendre les interactions variétés/ milieux", *Perspectives Agricoles*, 281, 12-17.

Broderick G.A. (1986) : "Relative value of solvent and expeller soybean meal for lactating dairy cows", *J. Dairy Sci.*, 69, 2948-2958.

Cabon G., Dersoir C., Soulard J., Carrouée B. (1997): "Utilisation du pois protéagineux (*Pisum sativum*) dans des rations pour vaches laitières déficitaires en PDI. Comparaison à des témoins connus", *Renc. Rech. Ruminants*, 4, 141.

Chapoutot P., Sauvart D. (1997) : "Nutritive value of raw and extruded pea-rapeseed blends for ruminants", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 65, 59-77.

Chilliard Y., Ferlay A., Doreau M. (2001) : "Contrôle de la qualité nutritionnelle des matières grasses du lait par l'alimentation des vaches laitières : acides gras trans, polyinsaturés, acide linoléique conjugué", *INRA Prod. Anim.*, 14, 323-335.

Chouinard P.Y., Corneau L., Butler W.R., Chilliard Y., Drackley J.K., Bauman D.E. (2001) : "Effect of dietary lipid source on conjugated linoleic acid concentrations in milk fat", *J. Dairy Sci.*, 84, 680-690.

Clarke E. J., Wiseman J. (2000): "Developments in plant breeding for improved nutritional quality of soya beans I. Protein and amino acid content", *J. Agric. Sci. Camb.*, 134, 111-124.

Cleale IV R.M., Klopfenstein T.J., Britton R.A. (1987) : "Induced non-enzymatic browning of soybean meal. I. Effects of factors controlling non-enzymatic browning on *in vitro* ammonia release", *J. Anim. Sci.*, 65, 1312-1321.

Clinquart A, Istasse L, Van Eenaeme C., Diez M, Dufrasne I, Bienfait J.M. (1993): "Influence de l'extrusion de mélanges de graines de lin et d'orge, de graines de pois et de colza et de fèves de soja sur la dégradabilité dans le rumen de leurs fractions azotée et lipidique et sur leur composition en acides gras", *Ann. Zootech.*, 42, 130-131.

Cros P., Benchaar C., Bayourthe C., Vernay M., Moncoulon R. (1991a) : "In situ evaluation of the ruminal and intestinal degradability of extruded whole lupin seed nitrogen", *Reprod. Nutr. Dev.*, 31, 575-583.

Cros P., Vernay M., Moncoulon R. (1991b) : "In situ evaluation of the ruminal and intestinal degradability of extruded whole horsebeans", *Reprod. Nutr. Dev.*, 31, 249-255.

Deacon M.A., de Boer G., Kennelly J.J. (1988): "Influence of jet- sploding and extrusion on ruminal and intestinal disappearance of canola and soybeans", *J. Dairy Sci.*, 71, 745-753.

Demjanec B., Merchen N.R., Cremin J.R., Aldrich C.G., Berger L.L. (1995) : "Effect of roasting on site and extent of digestion of soybean meal by sheep : I. Digestion of nitrogen and amino acids", *J. Anim. Sci.*, 73, 824-834.

Dhiman T.R., Korevaar A.C., Satter L.D. (1997) : "Particle size of roasted soybeans and the effect on milk production of dairy cows", *J. Dairy Sci.*, 80, 1722-1727.

Doreau M., Michalet-Doreau B. (1987) : "Tourteaux et graines de colza et de tournesol : utilisation digestive par les ruminants", *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix INRA*, 68, 29-39

Doreau M., Demeyer D. I., Van Nevel C.J. (1997): "Transformation and effects of unsaturated fatty acids in the rumen. Consequences on milk fat secretion", *Milk composition, production and biotechnology*, R. A. S. Welch, D. J. M. Burns, S. R. Davis, A. I. Popay, C. G. Prosser (eds). CAB International, New-York, pp 73-92.

Duc G., Marget P., Esnault R., Le Guen J., Bastianelli D. (1999): "Genetic variability for feeding value of faba bean seeds (*Vicia faba*) : Comparative chemical composition of isogenics involving zero-tannin and zero-vicine genes", *J. Agric. Sci. Camb.*, 133, 185-186.

Duc G, Bertrand D., Bourdon D., Carré B., Faurie F., Gallant D., Hess V., Huart M., Marget P., Melcion J.P., Moessner A., Mousset-Declas C., Seve B., Thibault J-F., Tisserand J-L. (2001): "Cotyledon cell-wall composition and distribution in *Pisum Sativum* L. : some genetic variability and its relationship with the seed grinding response and the nutritional value", *Proc. 4th European Conf. on Grain Legumes*, Cracow; Pologne, pp. 84-85.

Evrard J., Burghart P., Carré P. (1996): "Optimisation de la qualité des tourteaux par la technologie huilière", *OCL*, 5, 338-342.

Ewing D.L., Johnson D.E., Rumpler W.V. (1986) : "Corn particle passage and size reduction in the rumen of beef steers", *J. Anim. Sci.*, 63, 159-1515.

Faldet M.A., Satter L.D. (1991) : "Feeding heat-treated full soybeans to cows in early lactation", *J. Dairy Sci.*, 74, 3047-3054.

Faldet M.A., Voss V.L., Broderick G.A., Satter L.D. (1991) : "Chemical, *in vitro* and *in situ* evaluation of heat-treated soybean proteins", *J. Dairy Sci.*, 74, 2548-2554.

Ferlay A., Legay F., Bauchart D., Poncet C., Doreau M. (1992) : "Effect of a supply of raw or extruded rapeseeds on digestion in dairy cows", *J. Anim. Sci.*, 70, 915-923.

Focant M., Van Hoecke A., Vanbelle M. (1990) : "The effect of two heat treatments (steam flaking and extrusion) on the digestion of *Pisum sativum* in the stomachs of heifers", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 28, 303-313.

Freer M., Dove H. (1984) : "Rumen degradation of protein in sunflower meal, rapeseed meal and lupin seed placed in nylon bags", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 11, 87-101.

Goelema J.O., Spreewenbergh M.A.M., Hof G., Van Der Poel A.F.B., Tamminga S. (1998) : "Effect of pressure toasting on the rumen degradability and intestinal digestibility of whole and broken peas, lupins and faba beans and a mixture of these feedstuffs", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 76, 35-50.

Guéguen J., Lemarié J. (1996). "Composition, structure et propriétés physico-chimiques des protéines de légumineuses et d'oléagineux", *Protéines végétales*, B. Godon (ed.), Partie 3 : Propriétés biochimiques et physico chimiques des protéines végétales, Lavoisier, Paris, pp 80-119.

Hoden A. (1982) : "Valeur nutritive des légumineuses à graines pour les ruminants et utilisation par les vaches laitières", *Bull. Tech. C.R.Z.V., Theix, I.N.R.A.*, 49, 27-31.

Hsu J.T., Satter L.D. (1995) : "Procedures for measuring the quality of heat-treated soybeans", *J. Dairy Sci.*, 78, 1353-1361.

Huguet L., Hoden A., Malterre C., Geay Y., Micol D., Bertin G., Mourguet (1983) : "Utilisation des graines de lupin doux par les vaches laitières et les taurillons", *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix, I.N.R.A.*, 54, 61-71.

INRA, AFZ. (2002) : *Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage*, D. Sauvant, J.M. Perez, G. Tran (eds.), INRA Editions Paris, 301 p.

Jouany J.P., Michalet-Doreau B., Doreau M. (2000) : "Manipulation of the rumen ecosystem to support high-performance beef cattle", *Asian-Austr. J. Anim. Sci.*, 13, 96-114.

Julier B., Huyghe C., Papineau J., Milford G. F. J., Day J. M., Billot C., Mangin P. (1993) : "Seed yield and yield stability of determinate and indeterminate autumn-sown white lupins (*Lupinus albus* L.) grown at different locations in France and the UK", *J. Agric. Sci. Camb.*, 121, 177-186.

Kennelly J.J. (1996) : "The fatty acid composition of milk fat as influenced by feeding oilseeds", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 60, 137-152.

Kibelolaud A.R., Vernay M., Bayourthe C., Moncoulon R., Cros P. (1991) : "Estimation in situ chez le ruminant de la valeur azotée du lupin en fonction de la qualité du broyage et de la taille des particules", *Ann. Zootech.*, 40, 247-257.

Kibelolaud A. R., Vernay M., Bayourthe C., Moncoulon R. (1993) : "Effect of extruding on ruminal disappearance and lower gastrointestinal tract digestion of white lupin seeds", *Can. J. Anim. Sci.*, 73: 571-579.

McKinnon J.J., Olubobokun J.A., Mustafa A., Cohen R.D.H. (1995) : "Influence of dry heat treatment of canola meal on site and extent of nutrient disappearance in ruminants", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 56, 243-252.

Melcion J.P. (1987) : "Oléo-protéagineux et cuisson extrusion", *Les colloques de l'INRA, "Cuisson-extrusion"*, Ed. INRA, Paris, pp. 235-248.

Michalet-Doreau B., Vérité R., Chapoutot P. (1987): "Méthodologie de mesure de la dégradabilité *in sacco* de l'azote des aliments dans le rumen", *Bull. Tech. CRZV Theix, INRA*, 69, 5-7.

Michalet-Doreau B., Philippeau C., Doreau M. (1997) : "In situ and *in vitro* ruminal starch degradation of untreated and formaldehyde-treated wheat and maize", *Reprod. Nutr. Dev.*, 37, 305-312.

Mohamed O.E., Satter L.D., Grummer R.R., Ehle F.R. (1988) : "Influence of dietary cottonseed and soybean on milk production and composition", *J. Dairy Sci.*, 71, 2677-2688.

Moss A., Allison R., Stroud A., Collins C. (2000) : *Evaluation of heat-treated lupins, beans, and rapeseed meal as protein sources for dairy cows*, HGCA-Project report n° 0545, Home Grown Cereals Authority, Londres, ADAS-FEMS, 45 p.

Moss A.R., Deaville E.R., Givens D.I. (2001) : "The nutritive value for ruminants of lupin seeds from determinate and dwarf determinate plants", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 94, 187-198.

Murphy S.R., Mc Niven M.A. (1994) : "Raw or roasted lupin supplementation of grass silage diets for beef steers", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 46, 23-35.

Nakamura T., Klopfenstein T.J., Owen F.G., Britton R.A., Grant R.J., Winowiski T.S. (1992) : "Nonenzymatically browned soybean meal for lactating dairy cows", *J. Dairy Sci.*, 75, 3519-3523.

- Nozière P., Michalet-Doreau B., Rémond D., Fernandez I., Philippeau C., Poncet C. (2003) : "Relationship between in sacco degradation and ruminal digestion of starch", *Proc. 6th Int. Symp. Nutrition of Herbivores*, Merida, Mexico, 19-24 octobre 2003.
- Orias F., Aldrich C.G., Elizalde J.C., Bauer L.L., Merchen N.R. (2002) : "The effects of dry extrusion temperature of whole soybeans on digestion of protein and amino acids by steers", *J. Anim. Sci.*, 80, 2493-2501.
- Petit H. V., Rioux R., Ouellet D.R. (1997): "Milk production and intake of lactating cows fed raw or extruded peas", *J. Dairy Sci.*, 80, 3377-3385.
- Petit H. V., Tremblay G.F., Marcotte M., Audy R. (1999) : "Degradability and digestibility of full-fat soybeans treated with different sugar and heat combinations", *Can. J. Anim. Sci.*, 79, 213-220.
- Petit H. V., Tremblay G.F., Tremblay E., Nadeau P. (2002) : "Ruminal biohydrogenation of fatty acids, protein degradability, and dry matter digestibility of flaxseed treated with different sugar and heat combinations", *Can. J. Anim. Sci.*, 82, 241-250.
- Pires A.V., Eastridge M.L., Firkins J.L., Lin Y.C. (1997) : "Effects of heat treatment and physical processing of cottonseed on nutrient digestibility and production performance by lactating cows", *J. Dairy Sci.*, 80, 1685-1694.
- Plaisance R., Petit H.V., Seoane J.R., Rioux R. (1997) : "The nutritive value of canola, heat-treated canola and fish meals as protein supplements for lambs fed grass silage", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 68, 139-152.
- Poncet C., Rémond D. (2002) : "Rumen digestion and intestinal nutrient flows in sheep consuming pea seeds : the effect of extrusion of chestnut tannin addition", *Anim. Res.*, 51, 201-206.
- Poncet C., Michalet-doreau B., McAllister T., Remond D. (1995) : "Dietary compounds escaping rumen digestion", *Recent developments in the Nutrition of Herbivores*, M. Journet, E. Grenet, M-H Farce, M. Thériez, C. Demarquilly (eds), INRA Paris, pp. 167-204.
- Remond D., Le Guen M. P., Poncet C. (2003) : "Degradation in the rumen and nutritional value of lupin (*Lupinus albus* L.) seed proteins.; effect of extrusion", *Anim. Feed Sci. Technol.* (sous presse).
- Robinson P.H., McNiven M.A. (1993) : "Nutritive value of raw and roasted sweet white lupins (*Lupinus albus*) for lactating dairy cows", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 43, 275-290.
- Scott T.A., Combs D.K., Grummer R.R. (1991) : "Effects of roasting, extrusion and particle size on the feeding value of soybeans for dairy cows", *J. Dairy Sci.*, 74, 2555-2562.
- Shaver R. (1999) : "How to evaluate beans", *Feed Management*, 50 (6), 15-18.
- Singh C.K., Robinson P.H., McNiven M.A. (1995) : "Evaluation of raw and roasted lupin seeds as protein supplements for lactating cows", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 52, 63-76.
- Smulikowska S., Pastuszewska B., Swiech E, Ochatabinka A, Mieczkowska A., Nguyen V. C., Buraczewska L.(2001) : "Tannin content affects negatively the nutritive value of pea for monogastrics", *Proc. 4th Europ. Conf. on Grain Legumes.*, Cracow Pologne, pp. 124-125.
- Stanford K., Mcallister T.A., Xu Z., Pickard M., Chang K.J. (1995) : "Comparison of lignosulfonate-treated canola meal and soybean meal as rumen undegradable protein supplements for lambs", *Can. J. Anim. Sci.*, 75, 371-377.
- Stern M.D. (1984). "Effect of lignosulfonate on rumen microbial degradation of soybean meal protein in continuous culture", *Can. J. Anim. Sci.*, 64 (suppl. 1), 17-18.
- Stutts J.A., Nipper W.A., Adkinson K.W., Chandler J.E., Achacoso A.S. (1988) : "Protein solubility, in vitro ammonia concentration, and in situ disappearance of extruded whole cottonseed and other protein sources", *J. Dairy Sci.*, 71, 3323-3333.
- Tice E.M., Eastridge M.L., Firkins J.L. (1993) : "Raw soybeans and roasted soybeans of different particle sizes. I. Digestibility and utilization by lactating cows", *J. Dairy Sci.*, 76, 224-235.
- Tisserand J.L. (1977) : "Fieldbeans and field peas in ruminant feeding", *Protein quality from leguminous crops*, Commission of the European Communities – Eur 5686 – pp. 273-281.
- Titgemeyer E.C., Shirley J.E. (1997) : "Effect of processed grain sorghum and expeller soybean meal on performance of lactating cows", *J. Dairy Sci.*, 80, 714-721.
- Ueda K., Ferlay A., Loor J., Chilliard Y., Doreau M. (2002) : "Effect of linseed oil supplementation to different forage/concentrate ratio diets on ruminal digestion in dairy cows", *J. Dairy Sci.*, 85, (Suppl. 1), 314.
- Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J. L., Poncet C. (1987) : "Révision du système des Protéines Digestibles dans l'Intestin (PDI)", *Bull. Tech. CRZV Theix INRA*, 70: 19-34.

Von Keyserlingk M.A.G., Weurding E., Swift M.L., Wright C.F., Shelford J.A., Fisher L.J. (2000) : "Effect of adding lignosulfonate and heat to canola screenings on ruminal and intestinal disappearance of dry matter and crude protein", *Can. J. Anim. Sci.*, 80, 215-219.

Walhain P., Foucart M., Thewis A. (1992) : "Influence of extrusion on ruminal and intestinal disappearance *in sacco* of pea (*Pisum sativum*) proteins and starch", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 38, 43-55.

Wallace J. R., Falconer M.L. (1992) : "*In vitro* studies of conditions required to protect protein from ruminal degradation by heating in the presence of sugars", *Anim. Feed Sci. Technol.*, 37, 129-141.

Wang Y., Mc Allister T.A., Pic M.D., Xu Z., Rode L.M., Cheng K.J. (1999) : "Effect of micronizing full fat canola seed on amino acid disappearance in the gastrointestinal tract of dairy cows", *J. Dairy sci.*, 82, 537-544.

White C. L., Tabe L. M., Dove H., Hamblin J., Young P., Philips N., Taylor R., Gulati S., Ashes J., Higgins T.J.V. (2001) : "Increased efficiency of wool growth and live gain in Merino sheep fed transgenic lupin seed containing sunflower albumin", *J. Sci. Food Agric.*, 81, 147-154.

Yu P., Goelema J.O., Tamminga S. (1999) : "Determination of optimal conditions of pressure toasting on legume seeds for dairy industry. I. Effects of pressure toasting on nutritive values of *Lupinus albus* in lactating dairy cows", *Asian-Austr. J. Anim. Sci.*, 12, 1205-1214.

Yu P., Leury B.J., Egan A.R. (2002) : "Ruminal behavior of protein and starch free organic matter of *Lupinus albus* and *vicia faba* in dairy cows", *Asian-Austr. J. Anim. Sci.*, 15, 974-981.

Zimmer N., Cordesse R. (1996) : "Influence des tanins sur la valeur nutritive des aliments des ruminants", *INRA Prod. Anim.*, 9, 167-179.

SUMMARY

How can oil-seed crops and high-protein crops be better utilized in the feeding of ruminants

Oil-seeds and high-protein seeds are rich in protein and in energy; their fats generally contain large amounts of polyunsaturated fatty acids which are beneficial to human health. All these seeds however undergo a rapid degradation of their proteins in the rumen, bringing about a waste of nitrogen and but a marginal utilization as a source of nitrogen in the feeding of ruminants. How to reduce the degradability of proteins is known, but the applications are limited in view of the omnipotence of soybeans. Improvements by breeding are possible, but are not yet evaluated. In practice, a solution is found in the form of the presentation : the feed should be given whole or very roughly flattened rather than finely ground ; this is a simple way of protecting the proteins, and its efficiency is proved. It should be optimized and its impact on the nitrogen value quantified. Thermal treatments exist aplenty, but those that, in France, have gone beyond the stage of the pilot plant are rare, except extrusion and the heat treatments included in the oil-extracting processes, which give cakes as a by-product, the nitrogen value of which is vastly superior to that of the initial seeds. We have ranked these various thermal treatments (torrefaction, toasting, extrusion) according to their efficiency in increasing the proportion of treated feed proteins that escape ruminal degradation, independently of their cost. The processes used in oil-mills appear to be easily adaptable ; the chemical treatments are just mentioned in their principles.