

Traitements technologiques des protéagineux pour le monogastrique : exemples d'application à la graine de féverole

Un traitement technologique peut se définir comme l'application de facteurs physiques et/ou mécaniques, chimiques ou fermentaires à un substrat déterminé. En alimentation animale, son objectif est d'accroître l'ingestibilité et la digestibilité des aliments par augmentation de l'accessibilité des composants, modification de la fraction amylacée, inactivation ou élimination des facteurs antinutritionnels.

Les traitements potentiels sont nombreux : leur choix sera fonction du substrat, de sa morphologie, de sa texture, de sa composition, de la localisation des composants et de la sensibilité de ces derniers aux différents facteurs physico-chimiques pouvant être mis en œuvre. Dans ce qui suit, nous décrirons le principe des traitements physiques et mécaniques usuels, les principaux paramètres mis en jeu et leurs valeurs, en nous appuyant sur l'exemple d'une graine protéagineuse, la féverole.

1 / Composition de la graine

La féverole (*Vicia faba* L.) est une légumineuse appartenant à la famille des Papilionacées. Sa graine, de forme grossièrement ovale (grand axe

sur diamètre = 11 à 14 mm sur 7 à 9 mm), est constituée en première approximation, d'un tégument ("la coque"), et de cotylédons ("l'amande"). La proportion de coques varie de 12,5 à 14,7 % par rapport à la graine entière selon les cultivars (Wang et Überschär 1990).

La composition moyenne de la graine est donnée dans le tableau 1. Riche en matières azotées et en amidon, elle contient un certain nombre de facteurs antinutritionnels. La localisation des différents éléments, leur sensibilité aux traitements technologiques et leurs particularités nutritionnelles sont décrits dans un premier temps.

L.1 / Facteurs antinutritionnels

a) Tanins

Les tanins, étudiés dans la féverole par Martin-Tanguy *et al* 1977 ; Marquardt *et al* 1977, sont des composés polyphénoliques relativement thermostables définis par leur aptitude à se combiner aux protéines pour former des complexes insolubles. Ils réduisent la rétention de la fraction azotée de la ration chez le monogastrique avec pour conséquence une réduction de la vitesse de croissance et de l'efficacité alimentaire (Carré et Brillouet 1986 ; Garrido *et al* 1988) ainsi que du poids de l'œuf (Martin-Tanguy *et al* 1977). Leur effet dépressif semble dépendre de leur degré de polymérisation. Ils sont présents surtout dans le tégument, à la différence des autres facteurs antinutritionnels (Lacassagne 1988). Les teneurs s'échelonnent de 7,1 à 149 mg/g de tégument selon les variétés, soit 0,8 à 24 mg/g de graine (Wang et Überschär 1990).

Résumé

D'une manière générale, les traitements mécaniques, hydrothermiques et thermiques sont utilisables pour éliminer les composants indésirables des protéagineux et/ou accroître l'accessibilité de certains nutriments.

La morphologie de la graine, la localisation des composants et leur sensibilité aux facteurs physico-chimiques conditionnent les traitements à appliquer. Dans le cas de la féverole, les tanins, contenus dans les téguments, peuvent être éliminés par décorticage, les facteurs antitrypsiques et les lectines contenus dans l'amande peuvent être inactivés par la chaleur. De plus, le broyage, mais aussi les traitements thermiques et hydrothermiques (toastage, floconnage, infranisation, extrusion, agglomération) sont capables de modifier profondément l'accessibilité et les propriétés des composants majeurs de la graine (amidon, protéines). La composition de la graine peut être modifiée par la turboséparation.

L'efficacité nutritionnelle et industrielle des traitements technologiques est liée aux valeurs des paramètres de commande des procédés. Des procédés, de principe différents, peuvent générer des résultats similaires ; à l'opposé, des résultats très différents peuvent être obtenus à l'aide d'une même technique.

Tableau 1. Composition moyenne de la graine de féverole (par rapport à la MS)
(sources : enquête UNIP, ITCF, SIDO, 1985-1987)
(* Elkowicz et Sosulski, 1982).

| Composition chimique | Teneur (%) |
|---------------------------------|------------|
| Matière sèche | 87,6 |
| Matières azotées totales | 29,9 |
| Cellulose brute | 8,4 |
| Amidon (méthode Ewers) | 44,0 |
| Matières grasses | 1,5 |
| Cendres | 4,1 |
| NDF | 13,7 |
| ADF | 10,8 |
| Lignine | 0,3 |
| Tanins | 0,73 |
| Activité antitrypsique (UTI/mg) | 3,75 |
| Vicine | 0,55 |
| Convicine | 0,25 |
| Alpha-galactosides | 2,71 |
| Acide phytique (mg/g)* | 3,67 |
| Hémagglutinines (UH/mg)* | 10,50 |

b) Facteurs antitrypsiques

Les inhibiteurs tryptiques et chymotrypsiques sont des inhibiteurs de protéases (et d' α -amylases). Leur ingestion s'accompagne chez le rat, le porc et, dans une moindre mesure, chez le poulet, d'une perte accrue de protéines endogènes, sous forme d'un complexe inhibiteur-enzyme, riche en acides aminés soufrés, qui est excrété (Liener 1979). Ce phénomène accentue la carence des graines de légumineuses en ces acides aminés et la croissance de l'animal est alors ralentie. La baisse de la concentration d'enzyme dans l'intestin grêle conduit en même temps à une hyperactivité et à une hypertrophie du pancréas. Ces molécules, de nature protéique, sont relativement thermolabiles.

c) Lectines (ou phyto-hémagglutinines)

Ce groupe de composés, répandu dans le règne végétal, est très polymorphe. Ce sont des glycoprotéines, dont la caractéristique commune est leur affinité pour les sucres, expliquant leurs propriétés d'agglutination des hématies du sang *in vitro* (les lectines se combinent aux résidus glycosyl présents sur les parois des globules rouges), à des degrés variables selon la lectine et l'espèce animale considérées (Liener 1986). Leur ingestion se traduit par des retards de croissance, mal expliqués à ce jour. Les lectines sont des molécules généralement thermosensibles.

d) α -Galactosides

Ce sont de petits polymères de nature glucidique, constitués schématiquement de glucose et de saccharose liés en α 1-6 à N molécules de galactose (Cerning *et al* 1975). Ces molécules sont ther-

mostables. Les organismes supérieurs ne possèdent pas d' α -galactosidase, enzyme nécessaire à l'hydrolyse de la liaison entre le galactose et le glucose ainsi qu'entre deux molécules de galactose. Ces molécules ne traversent pas la paroi intestinale et se retrouvent donc intactes au niveau du colon où elles sont métabolisées par les microorganismes présents. La fermentation qui en résulte se traduit par une gêne au niveau digestif (flatulences, diarrhées) susceptible de ralentir l'ingestion d'aliment.

e) Vicine et convicine

La vicine et la convicine sont des glycosides (Marquardt et Ward 1984) constitués d'une molécule de glucose liée à un radical divicine (pour la vicine) et iso-uramyl (pour la convicine). Leur présence dans les aliments se traduit surtout chez la pouleuse par une réduction du poids moyen de l'œuf et une baisse de l'intensité de ponte (Muduuli *et al* 1981), restaurée par la présence de vitamine E et A, ou de chélatants du fer. Ces molécules seraient thermostables (Muduuli *et al* 1982).

1.2 / Les composants majeurs

La composition globale ne permet pas toujours de prévoir la valeur alimentaire de la graine, même lorsque sa teneur en facteurs antinutritionnels a été réduite à la suite d'un traitement technologique. La qualité de la protéine et la valeur énergétique de la fraction glucidique pourraient être liées à la structure intrinsèque des protéines d'une part, à celle des hydrates de carbone d'autre part, voire à l'association des deux (Van der Poel 1988). Ces caractéristiques peuvent expliquer les différences de valeur alimentaire de féveroles d'origines génétique et/ou agronomique différentes, et justifier la mise en œuvre de traitements adaptés.

a) Amidon et composés pariétaux

Les composés pariétaux sont caractérisés par une forte hygroscopicité, due à la présence de pentosanes, ou générateurs de furfural, capables d'absorber 20 à 50 fois leur poids d'eau. La graine en contient 4,6 à 6,9 % selon les variétés (Cerning *et al* 1975), essentiellement contenus dans les enveloppes (13,5 % de la matière sèche).

La féverole contient plus de 60 % d'hydrates de carbone, essentiellement composés d'amidon (42 % MS). L'homogénéité de la taille des granules d'amidon (17 à 40 μ m ; Colonna 1984) en font une matière première bien adaptée à la séparation par voie sèche (turboséparation), la séparation par voie humide étant gênée par la rétention d'eau due aux pentosanes.

Sa teneur en amylose est de 30-33 %, supérieure à celle des amidons "normaux" de céréales (23-28 %), et a fortiori des amidons de tubercules (20-25 %). Les températures de gélatinisation s'échelonnent de 61 à 69° C. La caractéristique de l'endotherme de gélatinisation est de 3,8 cal/g, intermédiaire entre les valeurs obtenues pour les amidons de céréales (2 à 3) et celui de pomme de terre (4 à 5). Cela signifie que, quelque soit sa

Les graines protéagineuses contiennent de nombreux facteurs antinutritionnels dont la teneur peut être réduite par différents traitements.

forme d'apport, l'énergie thermique nécessaire pour transformer l'amidon de la féverole est supérieure à celle nécessaire pour transformer l'amidon des céréales.

b) Protéines

La déficience en acides aminés soufrés et en tryptophane de la féverole est bien connue. De plus, certains acides aminés semblent présenter une faible disponibilité qui pourrait être liée à la structure même des protéines (Guéguen et Baniel 1990). En effet, les globulines de type 11S et 7S présentent des structures quaternaires globulaires, très compactes, peu accessibles aux enzymes et résistantes à la protéolyse *in vitro*. Un traitement thermique, en favorisant l'ouverture de ces structures, peut rendre accessibles les sites de clivage.

L'utilisation nutritionnelle des protéines de féverole est liée étroitement à la présence des inhibiteurs de protéases, des lectines et surtout des tanins, qui interfèrent avec la digestibilité et l'absorption des nutriments. Ainsi, la digestibilité des protéines d'une féverole génétiquement dépourvue de tanins (Blandine) est notablement supérieure (82,6 %) à celle (68,2 %) de graines riches en tanins (Alfred, Soravi), pour une teneur en facteurs antitryptiques équivalente (Lacassagne *et al* 1988).

2 / Définition et facteurs de variabilité d'un processus technologique

Un processus est commandé par des caractéristiques d'entrée, souvent appelées paramètres de commande ; les caractéristiques de sortie (ou encore performances) sont la réponse à la mise en œuvre du processus.

Les caractéristiques d'entrée prises en compte sont généralement des grandeurs continues ou discontinues relatives :

- à la matière première : texture, structure granulométrique, humidité,
- aux caractéristiques géométriques des matériels utilisés : dimensions de grilles de broyeurs ou de filières de presses, longueur et structure de vis d'extrudeur, hauteur et profil des cannelures de cylindres de floconneurs,
- aux réglages des matériels : débit d'alimentation, vitesse de rotation, température de chauffage, écartement des cylindres etc.

Ces paramètres de commande sont des grandeurs aisément accessibles, mais qui ne représentent pas les variables internes du processus, souvent plus difficiles à appréhender et auxquels ils sont liés : champs de pression, de température, de cisaillement, temps de séjour moyen ou plus exactement distribution des temps de séjour (figure 1).

Les caractéristiques de sortie comprennent d'une part les critères de rendement propres à la machine (débit horaire, énergie spécifique),

d'autre part les critères de qualité du produit (caractéristiques physico-chimiques, organoleptiques ou nutritionnelles).

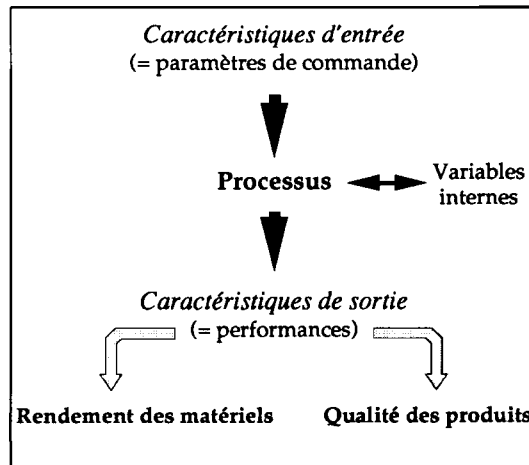


Figure 1. Schéma général d'un processus technologique.

La variation d'un paramètre de commande se répercute de multiples manières sur les variables internes du traitement en raison des interactions existantes. Le produit, à la sortie de l'appareil, est en quelque sorte la réponse à une variation donnée, mais cette réponse est d'autant plus aléatoire que le nombre de paramètres de commande et les valeurs qu'ils peuvent prendre sont plus élevés. La solution idéale est de pouvoir optimiser les conditions de traitement selon des critères qui peuvent être d'ordre biochimique et nutritionnel, mais aussi d'ordre économique : débit, consommation énergétique, investissement. Or, les essais effectués prennent souvent en compte une modalité, fixée sans optimisation préalable, d'un ou plusieurs types de traitement dont les principes peuvent être très différents. Ceci est en partie à l'origine de la variabilité des résultats obtenus.

Qu'il soit mécanique ou hydrothermique, un traitement s'applique à une matière première complexe considérée globalement. Les composants de la graine sont modifiés à des degrés divers, dans un sens favorable ou défavorable, et la résultante nutritionnelle est une réponse de synthèse parfois difficile à interpréter. Le traitement s'applique à des graines souvent variables dans leur texture et leur composition selon les cultivars, à l'intérieur d'une même espèce végétale, et ce qui est valable pour l'un ne l'est pas nécessairement pour l'autre. Les conditions de traitement sont donc à préciser et à adapter à chaque grand phylum génétique.

3 / Les traitements mécaniques

3.1 / Broyage simple

Au plan technologique, le broyage a pour but de réduire les composants de la graine (ou d'un ensemble de matières premières) en particules de granulométrie désirée afin de permettre un mélange plus homogène et plus stable et une mise en granulés plus aisée.

Les traitements modifient la structure de certains composés, protéines et amidon, et leur utilisation nutritionnelle.

L'augmentation de surface due à la fragmentation des grains en fines particules est susceptible d'augmenter leur "réactivité" (physique, chimique, ou enzymatique) et aussi, par la cassure des structures cellulaires, d'accroître la disponibilité de certains composants nutritionnels. Du fait de l'élévation de température, due à l'énergie d'arrachement des molécules, certaines caractéristiques physico-chimiques peuvent être également modifiées (protéines, amidon).

Le broyage peut s'effectuer par écrasement-friction (broyeur à meule), compression-cisaillement (broyeur à cylindres) ou par impact (broyeur à marteaux), ce dernier étant de loin le plus utilisé en alimentation animale (figure 2, David 1985). Le rendement de l'appareil (débit horaire et énergie spécifique) et les caractéristiques granulométriques du produit sont fonction de nombreux paramètres (tableau 2) dont les plus significatifs sont le diamètre des trous de la grille et la vitesse de percussion des marteaux. Les particules de farine sont d'autant plus fines que les trous de la grille sont de petit diamètre et la vitesse périphérique des marteaux plus élevée. Le temps de séjour moyen d'un produit à l'intérieur d'un broyeur à marteaux est de l'ordre de 3 s, certaines particules ne séjournant que 0,5 s, d'autres au contraire étant retenues jusqu'à 7 s (Hnilica *et al* 1986). Un temps de séjour élevé est généralement indicateur d'un recyclage élevé dans la cage du broyeur qui se traduit par une finesse de particule et un échauffement accrus. L'élévation de température résultant de la fragmentation (Niedieck 1976), qui peut atteindre plusieurs centaines de degrés pendant des temps très courts (de l'ordre de la microseconde), est globalement de 7 à 18° C selon les conditions.

L'emploi des appareils à cylindres nous amène à distinguer le broyage proprement dit, qui met en

Le broyage permet d'améliorer l'accessibilité de l'amidon et d'accroître sa digestibilité.

Figure 2. Broyeur à marteaux

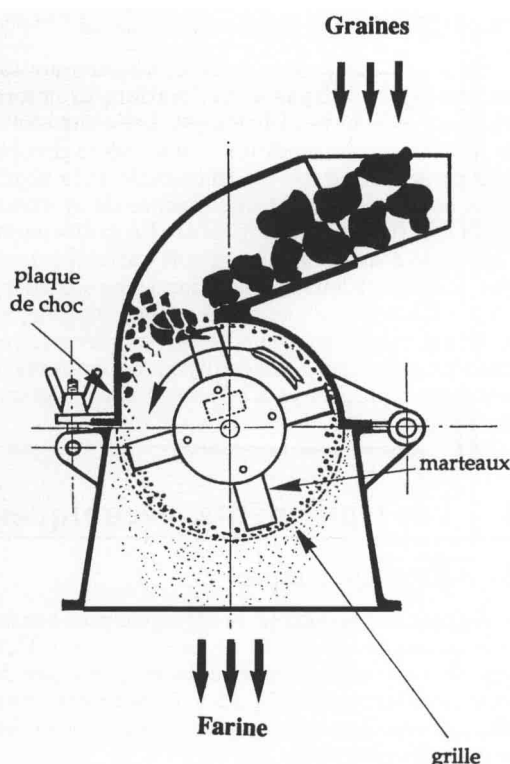


Tableau 2. Paramètres de commande d'un broyeur à marteaux et performances.

| Paramètres | Rendement (débit horaire) | Qualité (finesse de la farine) |
|-------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Marteaux : | | |
| . vitesse | +++ | +++ |
| . nombre | - | + |
| . largeur | + | - |
| . usure | -- | 0 |
| Aspiration | + | - |
| Grille : | | |
| . diamètre | +++ | -- |
| . surf. ouverte | + | - |
| . épaisseur | - | + |
| . usure | -- | ++ |

+ = influence positive - = influence négative
des paramètres considérés sur le débit horaire ou la finesse de la farine.

œuvre des cylindres tournant à vitesse différentielle dans un rapport de 2,5 à 1, du laminage (ou aplatissage) opération généralement complémentaire d'un traitement thermique, et dans laquelle les cylindres tournent à vitesse identique. Dans le premier cas, le produit obtenu est une farine dont la granulométrie varie selon l'écartement des cylindres et la forme des cannelures. Dans le second cas, que nous examinerons par la suite, il s'agit d'un flocon, d'épaisseur variable selon le degré d'humidité du grain, généralement comprise entre 0,3-0,8 mm.

Au plan nutritionnel, le broyage a deux conséquences : d'une part, sur le niveau de consommation, phénomène bien connu chez les volailles qui préfèrent un aliment dont la taille des particules se situe autour de 900 µm (Nir *et al* 1990), d'autre part sur la digestibilité des composants. Le type de broyeur utilisé, marteaux ou cylindres, n'entraîne pas de différence dans le comportement alimentaire de l'animal et l'utilisation de l'aliment, dans la mesure où les farines obtenues ont une granulométrie comparable. Dans le cas de la fève chez le poulet de chair, la digestibilité de l'amidon est accrue de 16 à 20 %, ainsi que l'énergie métabolisable, lorsque la taille moyenne des particules décroît de 500 à 160 µm (Lacassagne *et al* 1991 ; tableau 3). La digestibilité apparente de l'azote est par contre peu modifiée (Totsuka *et al* 1977). L'influence d'une élévation importante de température est sans doute à préciser.

3.2 / Décortiquage

Le décortiquage a pour but de séparer la graine de fève en deux parties : une fraction "coques" et une fraction "amandes". Il permet d'extraire la quasi totalité des tanins contenus dans les téguments, et une grande partie des constituants pariétaux. Le décortiquage consiste en un concassage, le plus souvent sur cylindres cannelés tournant à vitesse différentielle, suivi d'une séparation associant souvent tamisage (séparation selon la

Tableau 3. Taille de particules et valeur nutritive de la féverole décortiquée (variété Alfred) chez le poulet de chair. (Lacassagne et al 1991).

| Diamètre moyen des particules | 0,502 mm | 0,160 mm |
|---|------------|------------|
| Digestibilité apparente de l'azote (%) | 82,0 ± 2,2 | 85,0 ± 2,0 |
| Digestibilité de l'amidon (%) | 74,4 ± 1,7 | 90,9 ± 0,5 |
| Energie métabolisable apparente (kcal/kg de MS) | 2725 ± 122 | 3574 ± 110 |

Tableau 4. Décortiquage de la féverole (variété Pavanne) et utilisation digestive (CUD) chez le porc (Henry et Bourdon 1973).

| | Féverole entière | Féverole décortiquée |
|--|------------------|----------------------|
| CUD de l'énergie (%) | 87 | 94 |
| Energie digestible (kcal/kg de MS) | 3900 | 4100 |
| CUD de l'azote (%) | 80 - 85 | 89 |
| Matières azotées totales | 26,5 | 33,0 |
| CUP* du régime : (N fixé / N ingéré) x 100 | 41,1 | 43,0 |

* CUP = coefficient d'utilisation pratique

taille des fragments) et tri densimétrique (séparation selon la densité).

Simple dans son principe, le décortiquage est un processus relativement complexe à mettre en œuvre. Le broyage ménagé donne naissance à un nombre variable de fractions intermédiaires (figure 3) qui pourront soit être traitées séparément, soit réassociées selon leur composition. Les produits terminaux ne sont donc pas purs, mais contiennent le plus souvent une petite part d'amandes dans les enveloppes et inversement. Les paramètres de commande du décortiqueur, en particulier l'écartement des cylindres, la différence de vitesse entre cylindres et la taille des cannelures sont à adapter en fonction de la taille de la graine et peuvent être optimisés (Maijer et Muuse 1988). Ainsi à titre d'exemple, pour une graine (Soravi) dont le diamètre approché est de 8 mm en moyenne, l'écartement des cylindres est de 3,8 mm, le rapport de vitesse est de 1 à 1,25 et la hauteur de cannelures de 2,1 mm (Melcion *et al* 1989). Un pré-traitement thermique est généralement nécessaire : il consiste en un séchage rapide de l'enveloppe, précédé ou non d'une réhydratation de l'amande selon son degré de siccité initial.

Pour des variétés riches en tanins le décortiquage accroît de 16 % la teneur en matières azotées totales par rapport à la matière sèche, mais l'énergie brute est légèrement réduite. Chez le porc, la digestibilité des protéines et de l'énergie est accrue de 8 % et 5 % respectivement par rapport à la graine entière (Henry et Bourdon 1973, tableau 4). Les performances d'élevage sont également accrues, l'indice de consommation est réduit de 0,07 points mais, selon Eggum (1980), la différence ne justifie pas le coût du traitement. Chez le

poulet de chair (Lacassagne *et al* 1991, tableau 5), le décortiquage de variétés contenant des tanins entraîne de la même manière une augmentation significative de la digestibilité des protéines et de l'énergie métabolisable, mais ne modifie pas la valeur nutritionnelle de variétés sans tanins. La digestibilité de l'amidon n'est pas modifiée par le décortiquage quelle que soit la variété.

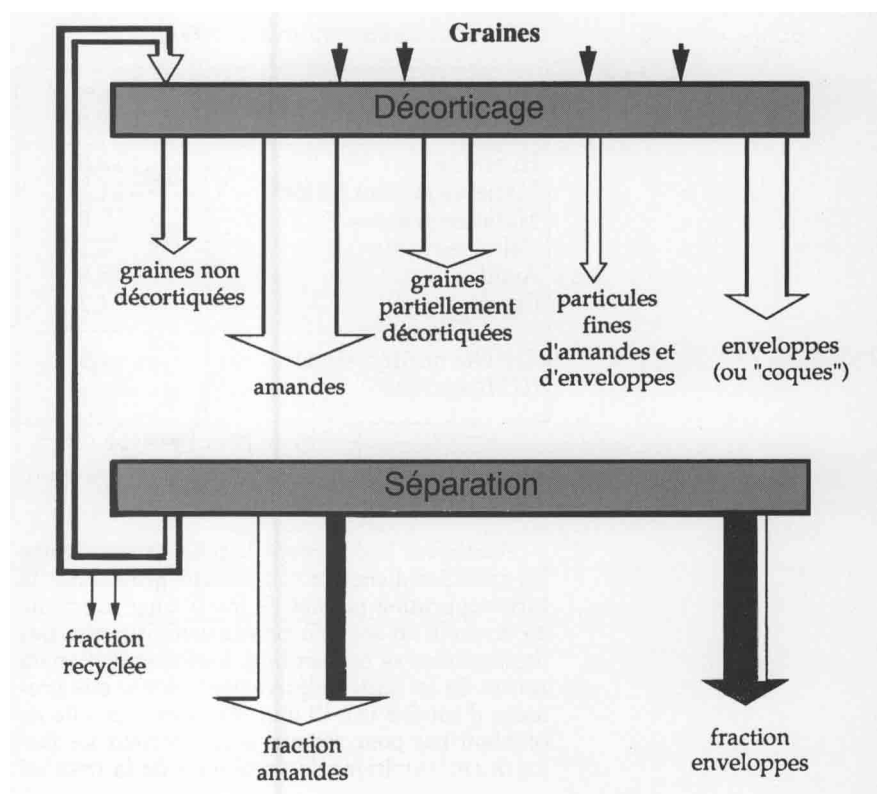
Figure 3. Principe du décortiquage.


Tableau 5. *Décorticage de la féverole et utilisation digestive par le poulet de chair (Lacassagne et al 1991).*

| | variété colorée (Alfred) | | variété sans tanins (Blandine) | |
|------------------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | Graine reconstituée | Cotylédons | Graine reconstituée | Cotylédons |
| CUDA de l'azote (%) | 69,4 | 82,0 | 84,2 | 81,1 |
| CUDA de l'amidon (%) | 70,3 | 74,4 | 63,8 | 60,7 |
| Energie métabolisable (kcal/kg) | 2285 | 2725 | 2201 | 2517 |

En pratique, la composition d'une féverole décortiquée industriellement varie légèrement (tableau 6). Le décorticage accroît de 2 à 3 points les matières azotées et de 250 kcal l'énergie métabolisable mesurée chez le coq par rapport à la graine initiale, mais en valeur absolue, l'énergie métabolisable du produit décortiqué peut différer selon la graine de départ et le taux de décorticage (exprimé par le rapport coques extraites/coques totale en %). La teneur en tanins est réduite de 2/3 environ. La teneur en facteurs antitrypsiques est accrue de 19 à 20 %. Le rendement industriel admis est de 80 %. En 1990, l'écart entre le prix d'intérêt de la féverole décortiquée et le cours de la graine entière se situait entre 0,15 et 0,22 F/kg dans un aliment pour poulet de chair, et entre 0,09 et 0,13 F/kg dans un aliment pour dinde, selon la conjoncture (Van Den Horst et Maitre 1990).

Le décorticage laisse subsister un co-produit, dont la teneur en enveloppes est variable (de 80 à 100 %), qui peut constituer une matière première de l'alimentation du ruminant (Edwards *et al* 1973 ; De Monredon *et al* 1987).

Tableau 6. *Composition d'une féverole décortiquée industriellement (Kaysi 1991).*

| Composition chimique | Teneur en % de MS |
|--|----------------------|
| Humidité | 12,8 |
| Matières azotées totales | 31,1 |
| Matières grasses | 2,0 |
| Cellulose brute | 2,1 |
| Amidon | 48,8 |
| Cendres | 4,2 |
| Activité antitrypsique (UTI/mg de MS) | 4,9 |

3.3 / Turboséparation

Fondée sur la différence de taille existant entre les granules d'amidon et les corps protéiques, la turboséparation permet de fractionner la graine de féverole en ses principaux constituants. Les protéagineux se prêtent bien à cette opération en raison de la taille relativement élevée des granules d'amidon (17-40 μ m). En revanche, elle ne convient pas pour séparer sélectivement les facteurs antinutritionnels protéiques de la fraction

protéique totale (Elkowicz et Sosulski 1982).

La turboséparation consiste en un broyage ultra-fin (de 3 à 30 μ m) de la graine, éventuellement décortiquée, suivi d'une séparation centrifuge par air (Prem et Piat 1977). Les particules riches en amidon, plus lourdes et de taille élevée sont séparées des particules protéiques, de taille plus faible. La vitesse de l'air permet de définir un seuil de coupure granulométrique entre particules fines et particules grossières. Le décorticage préalable permet d'éviter la contamination de la fraction la plus dense par des composants celluloseux. Le degré d'enrichissement en protéines ou en amidon de chacune des fractions est inversement proportionnel à la quantité recueillie, et en étroite relation avec la finesse de broyage et le niveau de coupure granulométrique (Cloutt *et al* 1986). L'acide phytique ainsi que les inhibiteurs tryptiques et les α -galactosides sont associés à la fraction protéique, qui peut contenir 50 à 70 % de protéines brutes (Sosulski 1983).

A titre d'exemple, Vose *et al* (1976) ont obtenu, à partir de féverole décortiquée contenant 31,9 % de matières azotées totales, en deux passages et pour un point de coupure granulométrique d'environ 15 μ m :

* 48 % d'une fraction contenant 61,7 % de MAT et 10,9 % d'amidon,

* 52 % d'une fraction contenant 4,2 % de MAT et 76,6 % d'amidon.

La valeur nutritionnelle de telles fractions, de même que la sensibilité des facteurs antinutritionnels à des traitements thermiques complémentaires doit encore être précisée.

4 / Traitements thermiques et hydrothermiques

Un traitement hydrothermique revient à combiner l'action de l'eau et de la chaleur pendant une durée variable (de quelques secondes à plusieurs dizaines de minutes), complétée souvent d'un traitement mécanique qui cisaille le produit. Nous distinguerons dans ce qui suit de manière un peu artificielle 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, et les traitements thermiques proprement dits utilisant l'eau contenue dans la graine.

Le décorticage permet d'éliminer les tanins contenus dans les téguments des variétés colorées et d'accroître la digestibilité des protéines.

4.1 / Etude cinétique

Avant d'étudier directement l'influence d'un traitement à l'échelle pilote ou industrielle, il peut être utile de préciser en laboratoire quelle peut être l'influence de la chaleur et de l'hydratation. L'Analyse Thermique Différentielle (ATD) est alors un outil précieux d'évaluation : on mesure, en fonction du temps ou de la température, la quantité de chaleur restituée pour une vitesse de chauffage constante d'un échantillon. Une absorption traduit une transition de phase et une transformation moléculaire du substrat. Cette technique, déjà utilisée pour étudier la gélatinisation de l'amidon et la dénaturation des protéines, pourrait être étendue à l'inactivation des facteurs anti-nutritionnels (Vooijs *et al* 1990). C'est ainsi que l'on a pu montrer que des inhibiteurs tryptiques extraits étaient plus thermosensibles en présence de molécules de haut poids moléculaire (protéines ou hydrates de carbone) qu'à l'état pur ; plus l'humidité est élevée, plus ils seraient sensibles à la chaleur.

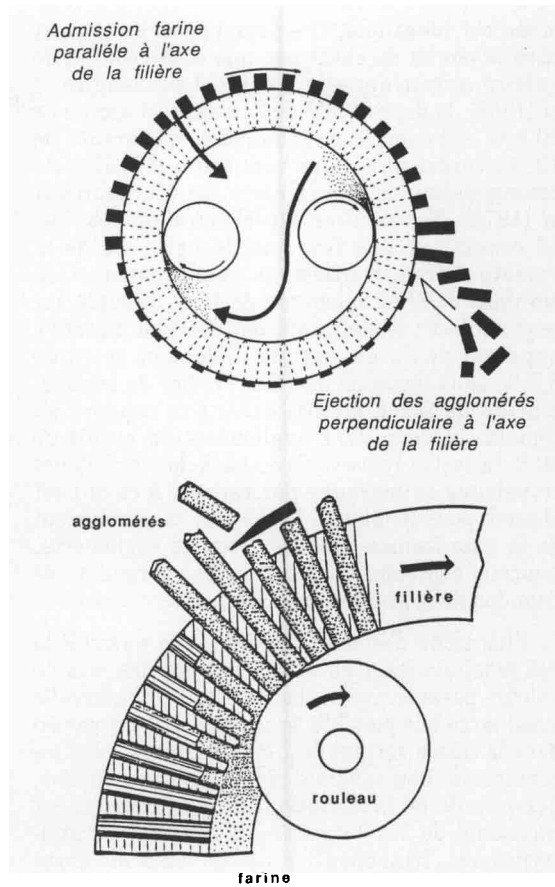
4.2 / Traitements hydrothermiques

a) Agglomération

L'agglomération (ou pressage ou encore "granulation") intervient à la fin de la fabrication d'un aliment composé. Cette opération a pour but de réduire le volume apparent de l'aliment afin d'en faciliter le stockage, le transport et la manutention. Les pertes au sol ou à l'auge, le tri par les animaux sont également limités.

L'opération 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 (David et Lefumeux 1973). Les rouleaux de la presse forcent le mélange à traverser les orifices d'une filière, (figure 4) créant ainsi une pression à l'intérieur de celle-ci (0,6 à 1,2.10⁵ kPa) proportionnelle à la surface interne des canaux, à l'élasticité de la matière et à son coefficient de frottement. Les particules sont alors tassées, déformées et soudées les unes aux autres par différents mécanismes (Rumpf et Herrmann 1970) sans que le produit compacté perde toutefois sa texture particulière. La vapeur a pour but de transformer superficiellement les particules et de modifier leur comportement "rhéologique" (plastification) durant le compactage.

Il s'agit d'un traitement hydrothermique au sens strict : l'eau est présente à l'origine ou apportée par la vapeur (1,5 à 4 % en masse). L'intensité du traitement est conditionnée par la chaleur apportée par la vapeur et la chaleur générée par le cisaillement dans les canaux de filière, ainsi que par le temps de séjour dans le conditionneur (10 à 50 sec) et dans la filière (5 à 18 sec). L'énergie thermique consommée (16 à 48 kWh/t) varie en sens inverse de l'énergie mécanique (37 à 19 kWh/t) selon Duquerois 1991. Ces facteurs sont reliés directement aux commandes des presses : proportions et caractéristiques de la vapeur injectée, géométrie des filières caractérisées par leur taux de compression (qui exprime le rapport longueur de canal x diamètre de ce même canal), et débit d'alimentation. Le produit, dont la tempéra-



Formation du granulé à chaque passage devant le rouleau

ture à la sortie de la presse atteint 65 à 98° C, doit ensuite être refroidi. Dans le cas d'aliments riches en liquides (mélasses, substrats de fermentation), le pressage peut être précédé d'une maturation : l'aliment en farine est porté par injection de vapeur à une température de 60 à 65° C et brassé durant 20 à 45 minutes de manière à favoriser la pénétration du liquide dans les micropores des particules de farine.

Le critère principal de qualité du produit aggloméré est sa cohésion, qui s'exprime usuellement par sa dureté, ou résistance maximale à l'écrasement, et sa durabilité, ou résistance à l'abrasion et aux chocs. Friedrich (1980) cependant, signale que la température atteinte dans une couche de 0,2 mm d'épaisseur en périphérie du granulé, correspondant à une zone de friction intense, peut être de 134° C lorsque la température "moyenne" du produit est seulement de 95° C à la sortie de la filière. Or, l'importance en masse de cette couche superficielle est d'autant plus élevée que le diamètre de l'aggloméré est faible, toutes caractéristiques conservées par ailleurs. Pour l'animal, l'agglomération peut constituer un procédé de traitement des aliments déjà signalé par Calet (1965), dont il est parfois difficile de rapporter l'action à l'influence respective des modifications de texture et de composition biochimique.

L'agglomération entraîne une modification physico-chimique de la fraction amylacée, montrée sur le maïs par Mercier et Guilbot (1974). Dans le cas de la féverole, où l'on peut penser que le phéno-

Figure 4. Presse à filière annulaire (David et Lefumeux 1973).

L'agglomération conduit à une augmentation de l'énergie métabolisable et de la digestibilité apparente de l'azote.

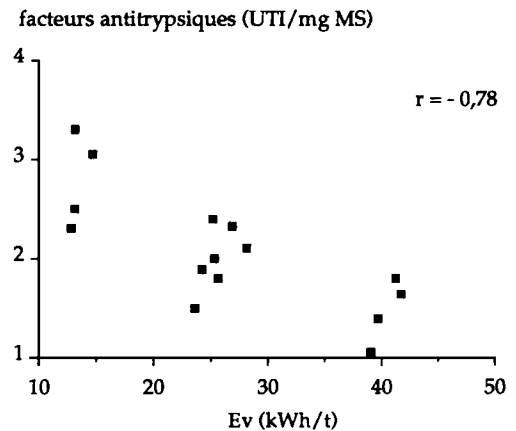
mène est identique, l'agglomération se traduit chez le poulet de chair par une amélioration de valeur nutritionnelle : selon Lacassagne *et al* (1988), la digestibilité de l'amidon est accrue de 10,8 % et l'énergie métabolisable apparente de 12 %, confirmant une réduction d'indice de consommation de 8 % signalée par Marquardt *et al* (1976). Nos propres expériences, menées sur 15 essais sur une féverole décortiquée de la variété Alfred, confirment une augmentation moyenne de l'EM apparente de 15 % mesurée sur coqs adultes ; le coefficient d'utilisation digestive apparent de l'azote est parallèlement accru de 8,2 %, sans toutefois modifier l'indice de consommation de façon significative par rapport au témoin (tableau 7). L'agglomération réduit de 20 % la lysine réactive et de 55 % les inhibiteurs trypsiques en moyenne par rapport à ce qui est observé pour le témoin. Le pouvoir de gonflement de la pâte formée avec les produits agglomérés, indicateur grossier du degré de transformation de l'amidon de la graine est très faiblement accru.

Plus riche d'enseignements est la variabilité des résultats (tableau 7) générée par des jeux de valeurs paramétriques choisis dans un intervalle aussi large que possible, le temps de séjour moyen dans la filière variant de 7 à 39 secondes selon les conditions. Peu sensible pour la lysine réactive, l'amplitude de la variation intra-traitement est cependant de 1 à 3 dans le cas des facteurs antitrypsiques. L'inactivation des facteurs antitrypsiques est d'autant plus importante que l'énergie apportée au produit sous forme de vapeur est élevée (figure 5). Chez l'animal, il n'apparaît pas de différences significatives entre les échantillons agglomérés, sauf dans le cas de l'énergie métabolisable, plus élevée lorsque l'énergie totale apportée par le pressage est plus importante.

b) Cuisson-extrusion

Le principe de la cuisson-extrusion consiste à soumettre aux effets conjugués de la pression (jusqu'à 200 bars) et de la température (de 90 à 250° C) durant un temps court (inférieur à 30 secondes), une matière première ou un mélange, hydratés ou non, et à les mettre en forme par passage forcé au travers d'une ou plusieurs filières. En raison de la faible diffusivité thermique des matières premières et de leur "viscosité" très élevée, il est nécessaire de travailler

Figure 5. Influence de l'énergie thermique apportée par la vapeur (Ev) sur la teneur en facteurs antitrypsiques de la féverole agglomérée.



en couche mince par l'intermédiaire d'une (extrudeur monovis) ou deux vis (extrudeur bi-vis) qui s'emboîtent dans un fourreau (figure 6). Le frottement est obtenu entre vis et fourreau dans le premier cas, d'une vis sur l'autre dans le second cas. L'eau, à l'état liquide à hautes pression et température, se vaporise en grande partie lorsqu'elle passe à pression atmosphérique à la sortie des filières, créant une structure alvéolaire caractéristique.

Il s'agit d'un processus complexe. Il y a simultanément cuisson, malaxage et texturation des produits à des degrés divers selon les paramètres de commande appliqués :

- nature et structure des matières premières, traduites par des constantes thermophysiques (propriétés thermiques, loi de comportement rhéologique),

- commandes de l'extrudeur : température de chauffage du fourreau, proportion d'eau ou de vapeur ajoutée à l'entrée de l'appareil, diamètre de la filière, débit d'alimentation et vitesse de rotation de la / ou des vis,

- caractéristiques géométriques : nombre de vis, configuration des vis et profil des chenaux, dispositifs de restriction disposés le long du fourreau, longueur et diamètre de la ou des filières. Ces facteurs peuvent varier pour un même appareil et

Tableau 7. Conséquences nutritionnelles chez le poulet de chair du niveau des énergies mécanique et thermique (vapeur) fournies au cours de l'agglomération d'une féverole décortiquée (variété Alfred) (Kaysi 1991).

| N° éch. | Origine et niveaux d'énergies fournies | | Energie mécanique spécifique (kwh/t) | Performances sur coqs | | sur poussins |
|---------|--|-----------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | mécanique | thermique | | Energie métabolisable (kcal/kg MS) | Digestibilité de l'azote CUDaN (%) | Indice de consommation |
| Témoin | / | / | / | 2958 | 77,2 | 1,66 |
| 2 | haute | basse | 20,6 | 3397 | 84,0 | 1,60 |
| 6 | basse | haute | 8,5 | 3316 | 83,1 | 1,60 |
| 7 | haute | haute | 26,1 | 3465 | nd | 1,59 |
| 14 | moyenne | haute | 23,4 | 3343 | nd | 1,60 |

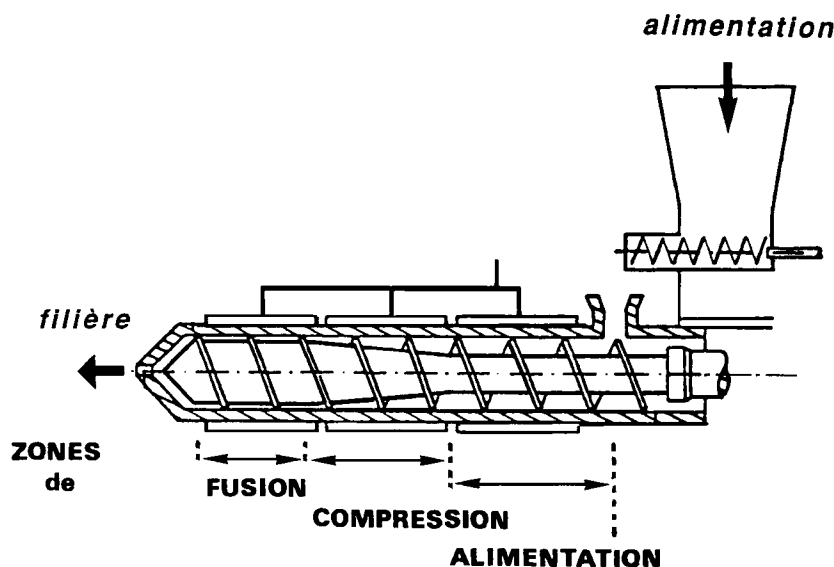
s'avérer différents selon les types d'extrudeurs qui constituent une famille très diversifiée de matériels.

La cuisson-extrusion entraîne des modifications profondes des caractéristiques physico-chimiques des produits. Si elle influe légèrement sur la teneur en acides aminés de concentrats de féverole turboséparés (Jeunink 1979), elle inactive quasi-totalement les facteurs antitrypsiques de graines brutes ou préalablement décortiquées (Melcion et Valdebouze 1977). Parallèlement, la fraction amyliacée est fortement modifiée : la fraction d'amidon facilement hydrolysable (Fh) est de 83 à 88 % dans les féveroles extrudées contre 2,5 à 6,5 dans les féveroles témoins. La solubilité de l'amidon est de 22 et 25 % (Cerning-Beroard 1977).

Contrairement à l'agglomération, la cuisson-extrusion est un procédé sévère au cours duquel le produit perd complètement sa structure particulière. Dans nos propres essais (Kaysi 1991), où nous avons étudié l'influence de la variation des conditions de cuisson-extrusion d'une féverole Alfred décortiquée (tableau 8), nous avons pu montrer que la réduction des facteurs antitrypsiques était brutale, supérieure à 95 % dans tous les cas. Par contre, les modifications des fractions protéiques et amyliacées s'échelonnent selon les jeux de valeurs paramétriques choisies : la lysine réactive est réduite de 7 à 47 %, et la solubilité des protéines dans la soude de 3 à 43 % par rapport au témoin lorsque les échantillons sont plus fortement traités. Parallèlement, la solubilité de l'amidon des échantillons dans l'eau à 30° C est accrue et son pouvoir de gonflement passe de 1,3 à 3,4. Ces modifications se traduisent par des variations de l'aspect des échantillons : la luminance (une composante de la couleur) des échantillons diminue de 68,6 à 46,5. Cette caractéristique peut être considérée comme une réponse globale aux transformations subies, et constituer un indicateur d'intensité de traitement.

Une réponse de synthèse à cette variabilité est apportée par l'animal. Chez le poulet, l'énergie métabolisable est accrue de 8 à 11 % et la digestibilité apparente de l'azote de 5 % (tableau 8) pour

Figure 6. Schéma d'un extrudeur mono-vis.



les conditions de traitement les plus douces (hydratation et taux de remplissage de vis élevés) par rapport à la féverole non extrudée. Dans des conditions drastiques, au contraire, l'énergie métabolisable n'est pas modifiée mais la digestibilité de l'azote est réduite de 3 % et l'indice de consommation significativement plus élevé.

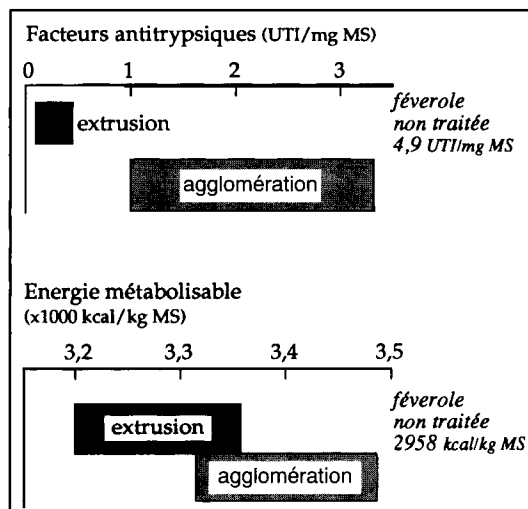
Nous n'avons pas trouvé de relation évidente entre déterminations *in vitro* d'une part, et critères nutritionnels mesurés *in vivo* d'autre part. Cependant, il est indéniable que la valeur nutritionnelle des produits peut être largement influencée de manière positive ou négative par les conditions de la cuisson-extrusion, et il convient d'être prudent lors de l'interprétation de résultats zootechniques. D'autre part, la comparaison avec l'agglomération montre qu'il est possible d'obtenir des résultats identiques, dans la mesure où les plages de variation se recoupent, en utilisant ces 2 techniques pourtant très éloignées l'une de l'autre (figure 7).

La cuisson-extrusion inactive les facteurs antitrypsiques et modifie les fractions protéique et amyliacée, dans un sens favorable ou défavorable selon les paramètres appliqués.

Tableau 8. Conséquences nutritionnelles chez le poulet de chair de l'hydratation (Hyd) de la farine et du taux de remplissage des vis de l'extrudeur (TdR) au cours de la cuisson-extrusion d'une féverole décortiquée (variété Alfred) (Kaysi 1991).

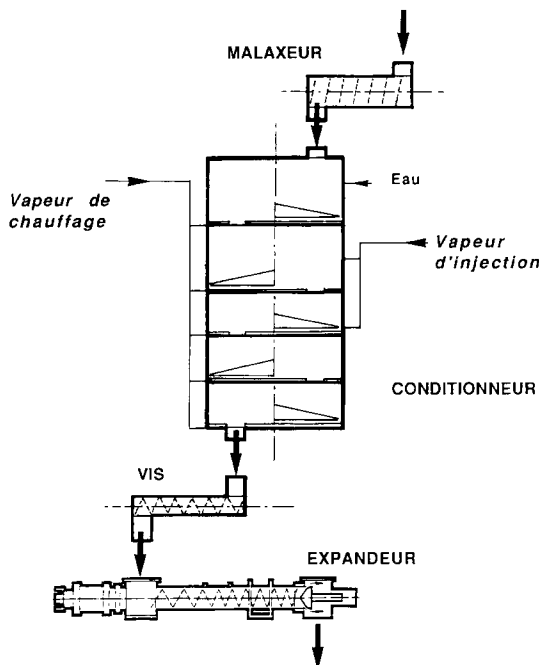
| N° éch. | Niveaux des commandes | | Energie mécanique spécifique (kwh/t) | Performances sur coqs | | sur poussins |
|---------|-----------------------|------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | Hyd | TdR | | Energie métabolisable (kcal/kg MS) | Digestibilité de l'azote CUDaN (%) | Indice de consommation |
| Témoin | / | / | / | 2958 | 77,2 | 1,66 |
| 4 | bas | bas | 185,7 | 3204 | 74,7 | 1,83 |
| 8 | bas | bas | 260,7 | 3209 | 78,7 | nd |
| 16 | bas | bas | 264,3 | 3246 | 78,8 | nd |
| 15 | bas | haut | 113,0 | 3359 | 82,5 | 1,70 |
| 14 | haut | haut | 102,5 | 3333 | 82,6 | nd |
| 9 | haut | haut | 117,2 | 3293 | 82,6 | 1,65 |

Figure 7. Effets de la cuisson-extrusion (16 essais) et de l'agglomération (15 essais) sur la valeur énergétique et la teneur en facteurs antitrypsiques d'une féverole décortiquée (Kaysi 1991).



Apparentée à la cuisson-extrusion, une technique communément appelée "conditionnement hydrothermique" ou "expansion" vient d'apparaître sur le marché. Il s'agit d'un conditionnement long dans des chauffoirs à étages où le produit porté à 90-95° C séjourne pendant 45 minutes à 1 heure à pression atmosphérique, suivi d'un laminage dans un "expandeur", appareil à extrusion annulaire dérivé des presses utilisées en huilerie (figure 8, Pipa et Frank 1989). La température du produit en sortie est de 90 à 110° C. Les données concernant cette technique, qui ne doit pas être confondue avec l'expansion (ou "popping" en anglais) décrite plus loin, sont encore fragmentaires. Employé seul, "l'expandeur" peut être utilisé uniquement pour pré-compresser une farine à seule fin d'améliorer la cohésion des agglomérés issus d'un pressage ultérieur, en présence de proportions élevées de matière grasse.

Figure 8. Appareil de conditionnement hydrothermique associé à un "expandeur" (Pipa et Frank 1989).



c) Floconnage

Le floconnage est une cuisson à la vapeur à basse pression ("steam-flaking" en anglais) injectée directement dans une colonne de conditionnement où le produit est brassé à l'aide d'agitateurs horizontaux. Il séjourne dans la colonne 10 à 20 minutes à température de 92 à 96° C à pression atmosphérique (figure 9) : l'humidité ajoutée sous forme de vapeur est alors de 4 à 6 %. La graine cuite, dont l'humidité finale est de 18 à 19 %, est ensuite aplatie entre deux cylindres cannelés tournant à vitesse identique, puis les flocons sont séchés, refroidis, tamisés et ensachés.

L'intensité du traitement est liée à la température et à la quantité de vapeur injectée, au temps de séjour dans la colonne de cuisson, à la teneur en eau de produit et à la géométrie des cylindres (cannelures, écartement et vitesse). La plage de variation est cependant restreinte, dans la mesure où l'efficacité de l'opération est liée à la mise en forme de flocons de texture définie. Bien qu'il ne s'agisse pas d'essais optimisés, les facteurs antitrypsiques de la féverole sont presque totalement inactivés et la fraction d'amidon facilement hydrolysable fortement accrue (Melcion et Valdebouze 1977 ; Cerning-Beroard 1977 : tableau 9).

4.3 / Traitements thermiques

L'autoclavage a souvent été utilisé comme méthode de référence en raison de sa souplesse. Il permet d'évaluer la thermosensibilité d'un composant mais se justifie peu au plan industriel. Signalons cependant l'existence de matériels industriels de ce type (appelés parfois "toasteurs"), fonctionnant sous des pressions de vapeur de 1,5-1,8 bar (133° C maximum), utilisés à notre connaissance pour la détoxification de la graine de colza entière (Zmudzinski 1989).

a) Infranisation

Le produit (graines prénettoyées), parfois réhumidifié jusqu'à 18-20 % d'eau, est réparti en une couche monograin sur un tapis convoyeur. Au cours de ce transfert, dont la durée peut varier de 40 à 90 secondes, le produit est soumis à l'action de rayons infrarouges émis par une série de brûleurs en céramique chauffés au gaz ou à l'électricité (figure 10). Ce rayonnement provoque la vibration des molécules en accord avec leur fréquence de résonance. Le frottement intermoléculaire entraîne un échauffement interne rapide ainsi qu'une élévation de la pression de vapeur d'eau. L'intérieur du grain ou de la graine peut atteindre des températures de 120 à 135° C, la perte d'eau au cours de l'irradiation seule est de 5 à 6 %. Les graines ainsi traitées sont ensuite aplaties dans un appareil à cylindres cannelés pour être transformées en flocons d'épaisseur voisine de 0,8 mm, puis refroidis.

Cette technique (en anglais "micronizing") ne doit pas être confondue avec la micronisation qui est un broyage réduisant les particules à une taille de quelques microns. D'autre part, elle utilise des ondes micrométriques, de longueur d'onde comprise entre 1,8 et 3,4 microns, domaine dis-

Tableau 9. Influence du floconnage d'une féverole entière ou décortiquée sur certaines caractéristiques physico-chimiques. (Cerning-Beroard 1977 ; Melcion et Valdebouze 1977).

| Type de graines | Traitements et conditions de floconnage | Caractéristiques d' α -amylolyse | | Facteurs antitrypsiques (UTI/mg) |
|----------------------|---|---|--------|----------------------------------|
| | | Vi | Fh (%) | |
| Graines entières | Non traitées | 4,6 | 8,0 | 6,40 |
| | Floconnées : * température finale : 92-94° C * humidification : + 4,6 % * temps de séjour : 33 minutes | 35,0 | 50,5 | 0,39 |
| Graines décortiquées | Non traitées | 5,1 | 6,5 | 7,70 |
| | Floconnées : * température finale : 95-96° C * humidification : + 3,2 % * temps de séjour : 19 minutes | 28,6 | 44,5 | 0,38 |

Lors du floconnage, le traitement mécanique est étroitement complémentaire du traitement thermique.

Vi = vitesse initiale d'amylolyse
Fh = fraction d'amidon facilement hydrolysable

tinct de celui des "micro-ondes" usuelles dont les longueurs d'onde sont comprises entre 10 et 30 cm.

L'intensité de l'infranisation varie selon la vitesse d'avancement de tapis convoyeur (durée d'irradiation), la taille des graines, la répartition de l'eau dans la graine, la longueur d'onde émise par les plaques infrarouges (la température de surface des brûleurs en céramique varie de 750 à 930° C) et la pression exercée par les cylindres floconneurs. Il a été montré que l'action mécanique due à l'aplatissage, connue dans le cas des céréales (Piva *et al* 1979), était étroitement complémentaire de l'action thermique sur l'endommagement de l'amidon de la féverole (Cerning-Beroard 1977, tableau 10). Ce traitement permet, selon les valeurs des paramètres mis en jeu, une inactivation notable des facteurs antinutritionnels thermolabiles (antitrypsiques et lectines) de la graine (tableau 11). Bien qu'il ne s'agisse pas d'essais optimisés, la valeur nutritive de la graine infranisée est accrue de 10 % environ par rapport au témoin non traité chez le poulet de chair (Mc Nab et Wilson 1974). Sont de même augmentées l'utilisation digestive de l'énergie (Besle *et al* 1981) et la digestibilité de l'azote (0,83 : Toullec *et al* 1980) chez le veau préruminant, sans toutefois atteindre celle de la poudre de lait écrémé (0,95).

b) Expansion

Dans ce procédé, la chaleur est communiquée aux graines par de l'air porté à 280-300° C en lit fluidisé (figure 11). En 90 à 120 secondes, le produit atteint 130 à 150° C et l'eau interne, brutalement vaporisée, peut provoquer l'éclatement de la graine ("popping" en anglais). Cet effet mécanique peut être complété par un floconnage tandis que l'air chaud est recyclé (Berthet 1987).

c) Toastage

Il s'agit essentiellement d'un chauffage direct de la graine ("roasting" en anglais), utilisant simultanément plusieurs modes de transmission

Figure 9. Principe du floconnage à la vapeur.

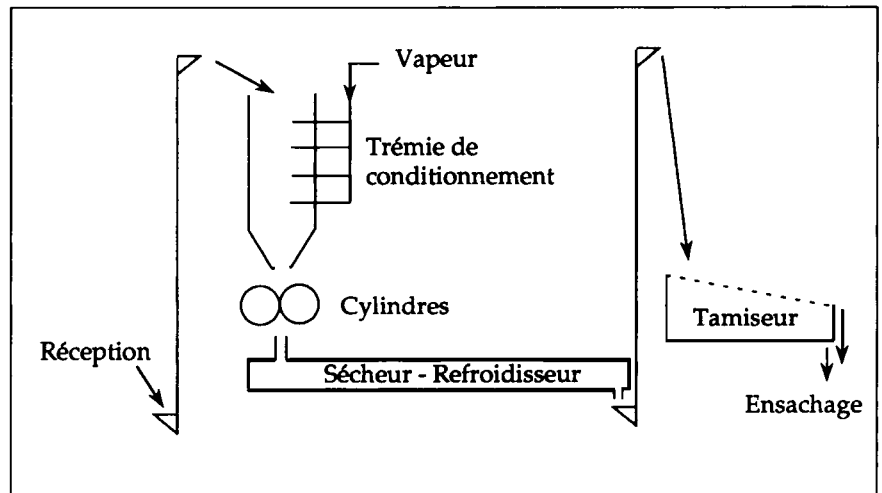


Figure 10. Principe de l'infranisation.

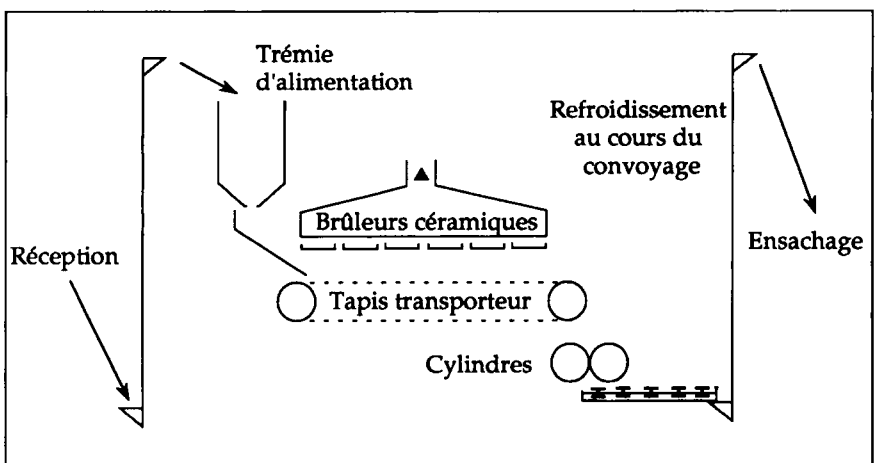


Tableau 10. Complémentarité des traitements thermique (irradiation) et mécanique (aplatissage) au cours de l'infranisation de graines de féverole (Cerning-Beroard 1977 ; Melcion et Valdebouze 1977).

| Type de graines | Conditions de traitement | Caractéristiques d'amylolyse | | F.A.T. (UTI/mg) |
|-----------------|---|------------------------------|--------|--------------------|
| | | Vi | Fh (%) | |
| entières | Graines non traitées | 1,2 | 2,5 | 6,3 |
| | Graines irradiées : * temps de séjour : 55 secondes * Perte d'eau : - 5,1 % * température finale : 150° C | 9,8 | 16,0 | 0,4 |
| | Graines irradiées et aplaties | 12,7 | 28,0 | 0,7 |
| décortiquées | Graines non traitées | 2,0 | 2,5 | 7,5 |
| | Graines irradiées : * temps de séjour : 52 secondes * perte d'eau : - 10,6 % * température finale : 148° C | 3,5 | 3,5 | 2,5 |
| | Graines irradiées et aplaties | 4,8 | 6,5 | 2,3 |

F.A.T. = facteurs antitrypsiques

Vi = vitesse initiale d'amylolyse

Fh = fraction d'amidon facilement hydrolysable

de la chaleur : conduction (support solide), convection (air chaud) et rayonnement. Le produit est introduit dans un appareil à tambour de principe analogue à un déshydrateur à fourrage (figure 12, Schmidt 1987), où il est brassé par des palettes disposées à l'intérieur du cylindre. La chaleur est en grande partie transmise par l'air de combustion et par rayonnement, grâce à un déflecteur en céramique qui capte les calories émises par un brûleur situé à l'arrière de l'appareil (600 à 900° C) et la restitue dans la totalité du tambour. La graine est récupérée à la sortie et l'air chaud recyclé. L'humidité initiale du produit à traiter, et surtout le temps de séjour (de 60 secondes à plusieurs minutes) dans l'appareil sont les paramètres qui conditionnent l'intensité du traitement thermique. Le temps de séjour optimal, pour des graines de soja car il n'existe pas à notre connaissance d'essais sur la féverole, est de 90 secondes,

ce qui correspond à une température de sortie de 135 à 140° C et une perte d'eau de 9 %.

Un deuxième type d'appareil utilise un support (sable, pastilles de céramique) mélangé à la graine pour favoriser le transfert thermique (196-204° C). Ce support est séparé par tamisage à la sortie de l'appareil et recyclé. Le temps de transit de graines de haricots, dont les facteurs antitrypsiques ont été inactivés à 75 % par ce procédé, est de 20-25 secondes (Cowan 1979).

Cette technique ne doit pas être confondue avec le toastage, appliqué en huilerie aux tourteaux de soja ou de colza en fin d'extraction. Il s'agit dans ce cas d'un chauffage indirect par la vapeur dans les doubles parois d'un chauffeoir à étages.

Conclusion

D'une manière générale, et dans le cas de la féverole, les traitements mécaniques et physiques sont utilisables pour éliminer des facteurs indésirables (cellulose, tanins, facteurs antitrypsiques) et pour accroître l'accessibilité de certains nutriments.

Le choix du traitement est fonction du but à atteindre. Son efficacité dépend des valeurs prises par les paramètres de commande du procédé qu'il est nécessaire d'optimiser sur des critères nutritionnels mais aussi industriels (énergie spécifique, débit horaire). Des procédés de principe différents peuvent générer des résultats similaires ; à l'opposé, des résultats très différents peuvent être obtenus à l'aide de la même technique.

Enfin, dans bien des cas, il serait nécessaire d'effectuer des études permettant de comprendre les mécanismes de transformation de substrats complexes sous l'influence combinée des facteurs physiques en cause.

Tableau 11. Influence de l'infranisation et de sa durée sur l'activité antitrypsique de la féverole décortiquée (var. Ascott) (Melcion et Valdebouze 1977).

| Type de graine | Conditions de traitement | Activité antitrypsique | |
|----------------|---|------------------------|-----------|
| | | (UTI/mg MS) | (% perte) |
| Non traitée | | 8,0 | 0 |
| Infranisée | * durée : 46-47 sec. * température : 115-122° C * perte d'eau : - 4,8 % | 2,0 | 75 |
| | * durée : 40 sec. * température : 114-120° C * perte d'eau : - 6,6 % | 5,6 | 30 |
| | * durée : 21-22 sec. * température : 100-108° C * perte d'eau : - 5,9 % | 7,7 | 4 |

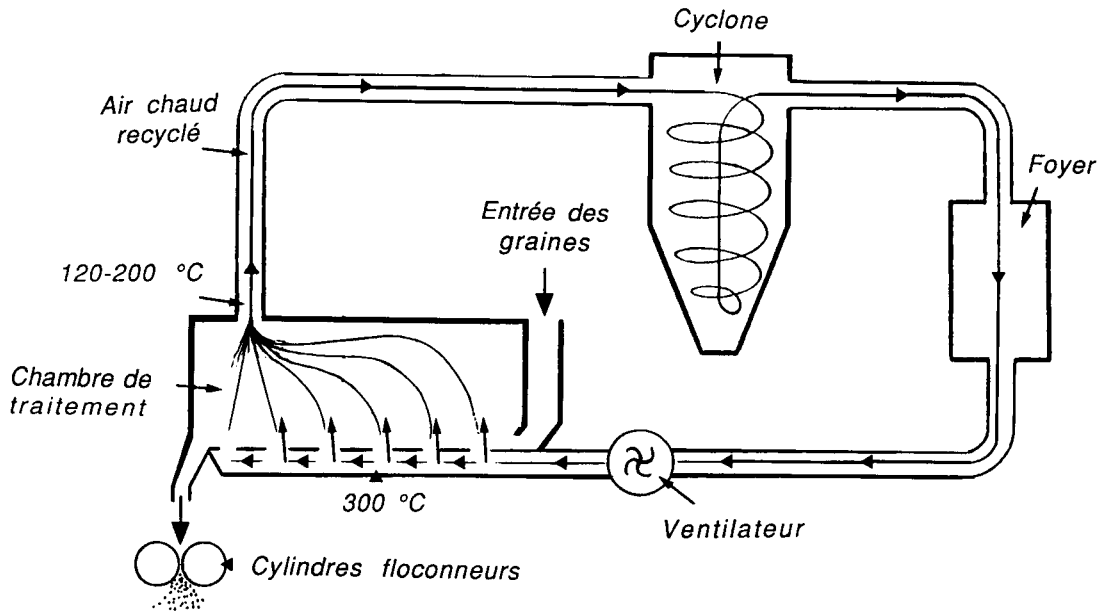


Figure 11. Principe de l'expansion (Jet-Sploder) (Berthet 1987).

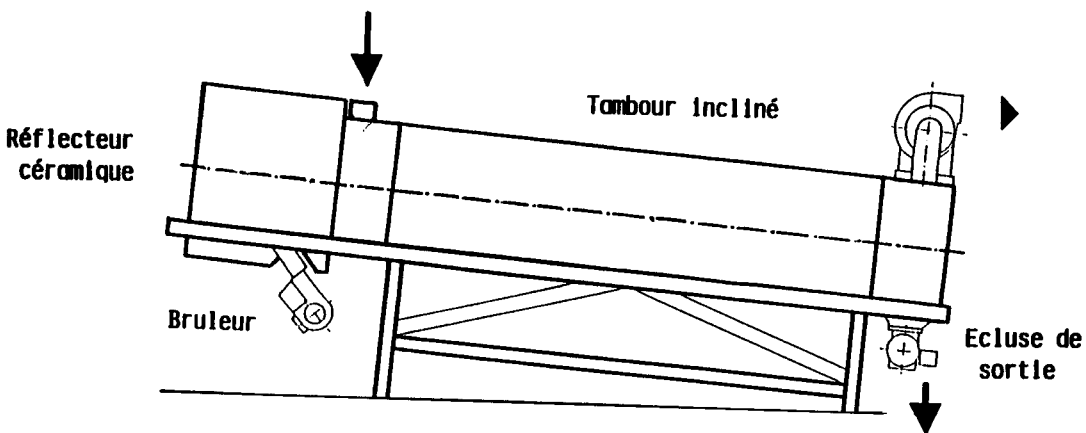


Figure 12. Toastage par rayonnement (Schmidt 1987).

Références bibliographiques

- BERTHET J., 1987. Jet Sploder ou Popping. *Rev. Alim. Anim.*, (413), 22-24.
- BESLE J.M., LASSALAS B., THIVEND P., 1981. Digestion des glucides cytoplasmiques de la féverole par le veau préruminant. *Reprod. Nutri. Dévelop.*, 21, 629-649.
- CALET C., 1965. The relative value of pellets versus mash and grain in poultry nutrition. *World's Poultry Sci. J.*, 21, 23-52.
- CARRE B., BRILLOUET J.M., 1986. Yield and composition of cell wall residues isolated from various feedstuffs used for non-ruminant farm animal. *J. Sci. Food Agric.*, 37, 341-351.
- CERNING J., SAPOSNIK A., GUILBOT A., 1975. Carbohydrate composition of horse beans (*Vicia faba*) of different origins. *Cereal Chem.*, 52, 125-138.
- CERNING-BEROARD J., 1977. Effect of technological processing on the carbohydrate composition of horse beans and on the susceptibility of starch α -amylase. In : Protein quality from leguminous crops, EUR 5686 EN, p. 125-135.
- CLOUTT P., WALKER A.F., PIKE D.J., 1986. Air classification of flours of three legume species : effect of starch granule size distribution. *J. Sci. Food Agric.*, 37, 173-184.
- COLONNA P., 1984. Les amidons de légumineuses : structures et propriétés. Thèse Univ. Pierre et Marie Curie - Paris VI, 53 p.
- COWAN J.C., 1979. Dry roasting of beans. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 56, 168.
- DAVID L., 1985. Alimentation Animale. Tome (1), L'usine : Conduite et entretien (sauf presses). L. DAVID ed., La Jarrie (France), 112 p.
- DAVID L., LEFUMEUX J., 1973. Conduite et entretien des presses. L. DAVID ed., La Jarrie (France), 80 p.
- DUQUEROY G., 1991. La gestion de l'énergie dans l'industrie de l'Alimentation Animale. Symposium TECALIMAN, 18 avril, p. 12-28.
- EDWARDS D.G., DUTHIE I.F., ROGERS B., OWEN E., 1973. A note on the digestibility by sheep of hulls from the field beans. *Anim. Prod.*, 17, 329-332.
- ELKOWICZ K., SOSULSKI F.W., 1982. Antinutritive factors in eleven legumes and their air-classified protein and starch fractions. *J. Food. Sci.*, 47, 1301-1304.
- EGGUM B.O., 1980. Factors affecting the nutritional value of field beans (*Vicia faba*). In : *Vicia faba*. Feeding value, processing and viruses. DA. BOND ed, EEC Publ., Brussels-Luxembourg, p. 257-272.
- FRIEDRICH W., 1980. Zusatzstoffe und Mischfüttertechnik. *Kraftfutter*, 63, 210-220.
- GARRIDO A., CABRERA A., GOMEZ A., GUERRERO J.E., 1988. Relationship between tannins content and "in vitro" nutritive value in seeds of 24 strains in *Vicia faba* L. In : Recent advances of research in antinutritional factors in legume seeds, p. 297-300. J. Huisman, TFB. Van Der Pœl, I.E. Liener eds. Pudoc Publ. Wageningen (NL), 1989.
- GUEGUEN J., BANIEL A., 1990. Perspectives d'amélioration de la fraction protéique du pois (*Pisum sativum* L.). In : Symposium qualité des céréales, des oléagineux et des protéagineux français pour l'alimentation animale. Toulouse, 6 juillet, ITCF ed., p. 87-92.
- HENRY Y., BOURDON D., 1973. Utilisation digestive de l'énergie et des matières azotées de la féverole sous forme entière ou décortiquée, en comparaison avec le tourteau de soja. *Journées Rech. Porcine en France*. 5, 105-114.
- HNILICA P., THYN J., PECHLAK B., 1986. Analysis of hammer mill response to impulse inlet of radioactive tracer. *Powder Technology*, 45, 183-190.
- JEUNINK J., 1979. Modifications chimiques et physico-chimiques des protéines végétales texturées par cuisson-extrusion. Thèse Univ. Sci. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 84 p.
- KAYSI Y., 1991. Méthode d'évaluation de deux traitements de mise en forme des aliments des animaux : cuisson-extrusion et agglomération. Application à la graine de féverole décortiquée. Thèse Doctorat Université de Nantes, 160 p.
- LACASSAGNE L., 1988. Alimentation des volailles: substituts au tourteau de soja. Les protéagineux. INRA Prod. Anim., 1, 47-57.
- LACASSAGNE L., FRANCESCH M., CARRE B., MELCION J.P., 1988. Utilization of tannin-containing and tannin-free faba beans (*Vicia faba*) by young chicks: effects of pelleting feed on energy, protein and starch digestibility. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 20, 59-68.
- LACASSAGNE L., MELCION J.P., de MONREDON F., CARRE B., 1991. The nutritional values of faba bean flours varying in their mean particle size, in young chickens. *Anim. Feed Sci. and Technol.*, 34, 11-19.
- LIENER I.E., 1979. Significance for humans of biologically active factors in soybeans and other food legumes. *J. Am. Oil Chemist's Soc.*, 56, 121-129.
- LIENER I.E., 1986. Nutritional significance of lectins in the diet. In : The lectins : properties, functions and applications in biology and medicine. I.E. LIENER, N. SHARON, I.J. GOLSTEIN eds, Academic press Inc., London. p. 527-552
- MAIJER M.T., MUUSE B.G., 1988. Optimisation of dehulling technique and enzymatic hydrolysis of vicine/convicine to eliminate ANF's of faba beans. Workshop on antinutritional factors in legume seeds. Wageningen (NL), 23-25 nov. 1988.
- MARQUARDT R.R., Mc-KIRDY J.A., WARD T., CAMPBELL L.D., 1976. Studies with chicks on the growth depressing factors in faba beans (*Vicia faba* L. var. minor). *J. Nutr.*, 106, 275-284.
- MARQUARDT R.R., WARD A.T., CAMPBELL L.D., CANSFIELD P.E., 1977. Purification, identification and characterization of a growth inhibitor in faba beans (*Vicia faba* L. var minor) *J. Nutr.*, 107, 1313-1324.
- MARQUARDT R.R., WARD A.T., 1984. Chick performances as affected by autoclave treatment of tannin containing and tannin free faba beans. *Fabis Newsletter*, (8), 23-25.
- Mc-NAB J.M., WILSON J., 1974. Effect of heat treatment on the nutrient content of field beans (*Vicia faba* L.). In "Protein quality from leguminous crops". EUR 5686 EN, p. 99-104.
- MARTIN-TANGUY J., GUILLAUME J., KOSSA A., 1977. Condensed tannins in horse bean seeds : chemical structure and effects on the food value of the horse bean in growing poultry. In : "Protein quality for leguminous crops". EUR 5686 EN, p. 162-179.
- MELCION J.P., MORAT J.L., HOURNA R., KAYSI Y., 1989. Une méthode d'optimisation paramétrique : l'Anticomplex. *Rev. Alim. Anim.*, 426, 61-65.
- MELCION J.P., VALDEBOUZE P., 1977. Effect of various industrial treatments on the antinutritional factors of field beans. In "Protein quality from leguminous crops". EUR 5686 EN, p. 116-124.
- MERCIER Ch., GUILBOT A., 1974. Influence des conditions de granulation du maïs sur les caractéristiques physico-chimiques de son amidon. *Ann. Zootech.*, 23, 241-251.
- MONREDON (de) F., MELCION J.P., BARRY J.L., 1987. Digestibilité d'un résidu de décortiquage de féverole chez le mouton. *Rev. Alim. Anim.* 404, 2-4.
- MUDUULI D.S., MARQUARDT R.R., GUENTER W., 1981. Effect of dietary vicine on the productive performance of laying chickens. *Can. J. Anim. Sci.*, 61, 757-764.

- MUDUULI DS., MARQUARDT RR., GUENTER W., 1982. Effect of dietary vicine and vitamin E supplementation on the productive performance of growing and laying chickens. *Br. J. Nutr.*, 47, 53-60.
- NIEDIECK EA., 1976. Problèmes de broyage, mélange et agglomération avec exemples en sucrerie, confiserie et chocolaterie. *Cahiers de l'ENSBANA*, (0), 5-20.
- NIR I., MELCION JP., PICARD M., 1990. Effect of particle size of sorghum grains on feed intake and performance of young broilers. *Poultry Sci.*, 69, 2177-2184.
- PIPA F., FRANK G., 1989. High pressure conditioning with annular gap expander. A new way of feed processing. *Adv. Feed Technol.*, 2, 22-20.
- PIVA G., AMERIO M., BEGHIAN M., 1979. Sui principali trattamenti ai cereali : vaporizzazione e rullatura, fiocatura, micronizzazione, espansione, estrusione. *Tecnica Molitoria*, 30 (7), 497-511.
- PREM H., PIAT MA., 1977. Techniques de broyage et de sélection. *Documentation Alpine. Informations Chimie* n°172, déc.
- RUMPF H., HERRMANN W., 1970. Eigenschaften, Bindungsmechanismen und Festigkeit von Agglomeraten. *Aufbereitungstechnik*, 11, 117-127.
- SCHMIDT F., 1987. Trocknung und Wärmebehandlung von Getreide oder Sojabohnen mit einer neuentwickelten Wärmebehandlungsanlage. *Die Mühle*, 124, 179-181.
- SOSULSKI FW., 1983. Legume protein concentration by air classification. In : *Developments in food proteins*. Vol 2, B.J.F. HUDSON ed, Applied Science Publ., London-New-York. p. 173-213.
- TOTSUKA K., TAJIMA M., SAITO T., SHOJI K., 1977. Studies on the energy and protein value of faba beans for poultry rations. *Japan. Poultry Sci.*, 14, 109-114.
- TOULLEC R., COROLLER JY., PATUREAU-MIRAND P., MELCION JP., PRUGNAUD JP., VALDEBOUZE P., DELORT-LAVAL J., CERNING-BEROARD J., 1980. Influence des traitements technologiques sur l'utilisation des protéines de la féverole par le veau préruminant. *Ann. Zootech.*, 29, 339-361.
- VAN DEN HORST F., MAITRE I., 1990. Premiers résultats sur l'utilisation de la féverole décortiquée par les volailles. 6° journée ITAVI de l'alimentation. Paris, 17 mai. 32 p.
- VAN DER POEL AFB., 1988. Effect of processing on antinutritional factors and nutritional value of legume seeds for non-ruminant feeding. Workshop on antinutritional factors in legume seeds, WAGENINGEN (NL), 23-25.11.88, abst. n°37.
- VOOIJIS AJ., Van der STEEN PJ., BEUMER H., 1990. Kinetic methods for research into inactivation of antinutritional factors. *Adv. Feed Technol.*, 3, 34-38.
- VOSE JR., BASTERRECHEA MJ., GORIN PAJ., FINLAYSON AJ., YOUNGS CG., 1976. Air classification of field peas and horsebean flours : chemical studies of starch and protein fractions. *Cereal Chem.*, 53, 928-936.
- WANG PX., ÜBERSCHÄR KH., 1990. The estimation of vicine, convicine and condensed tannins in 22 varieties of fababeans (*Vicia faba* L.). *Anim. Feed Sci. Technol.*, 31, 157-165.
- ZMUDZINSKI R., 1989. Traitement hydrothermique de colza ayant pour but de réduire dans une large mesure la teneur en glucosinolates des produits finis. *Proc. Victam conf.*, Utrecht (NL), 23-26.05.89, 81 p.

Summary

Technological treatments of pulses : application to field bean.

Mechanical, hydrothermal and thermal treatments are available to remove or inactivate antinutritional factors of pulses and/or to increase the availability of some seed components.

Treatments have to be chosen according to the seed morphology, the localisation of the main components and their sensitivity to physico-chemical factors. In the faba bean example, tannins could be removed through dehulling and antitrypsic factors and lectins through heat and moisture addition. In addition, grinding but also thermal or hydrothermal treatments (roasting, steam-flaking,

micronizing, extrusion-cooking and pelleting) are able to greatly modify the accessibility and properties of the major seed components (starch, proteins). Air classification is able to change the composition of the seed.

The nutritional and industrial efficiency of technological treatments is connected to the values of their parameters. Separate processes are able to generate similar results. Reversely, very different results are seen using the same process.

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 (1) 3-17.