

La viscosité des aliments destinés à l'aviculture.

Utilisation pour prédire la consommation et l'excrétion d'eau.

En aviculture, l'identification des problèmes liés à la viscosité des aliments date d'environ une trentaine d'année. Cependant, compte tenu de la complexité du sujet, le contrôle rationnel du facteur "viscosité" n'a pu être mis en œuvre jusqu'à présent. Cet article fournit les méthodologies et les données chiffrées pour maîtriser un des effets négatifs induits par la viscosité, à savoir l'excrétion d'eau chez les dindonneaux de chair, facteur majeur dans la variation de la qualité de leur litière d'élevage.

La qualité des litières d'élevage est un facteur important dans les productions avicoles de par les nombreuses interactions qu'elle suscite. Celle-ci dépend du support de base (copeaux de bois, paille, papier broyé...), du

type d'animal, de la densité d'animaux au sol, de la durée de l'élevage, de la température, de la ventilation, de la répartition des mangeoires et abreuvoirs, et de l'aliment. La qualité et la quantité de litières vont avoir des conséquences sur leur manutention, les risques de pollution, l'état sanitaire des animaux, la croissance et la qualité des carcasses. La qualité des litières dépend, pour les risques de pollution, de leurs teneurs en azote et phosphore. Pour les autres aspects, c'est le degré d'humidité qui constitue un facteur déterminant : en effet, une humidité trop élevée d'une part favorise les développements microbiens, d'autre part finit par altérer le bréchet des animaux par contact avec la litière ce qui aboutit à une réduction de la qualité des carcasses. C'est le facteur "humidité des litières" qui va faire ici l'objet de notre attention.

Comme mentionné plus haut, l'aliment est un des éléments rentrant en ligne de compte, du fait des variations d'excrétion aqueuse qui peuvent être induites physiologiquement par les constituants des régimes. Les ions comme le potassium, sodium et chlore ont été bien identifiés comme facteurs de variation de l'excrétion aqueuse (Smith *et al* 1973, Smith et Teeter 1989) et sont facilement contrôlables. Un autre élément explicatif de l'aliment est la viscosité de la fraction soluble de l'aliment, due aux polysaccharides non amyliques hydrosolubles. Ce dernier élément explicatif a été mis en évidence il y a environ 25 ans (Moran *et al* 1969, Gohl *et al* 1978). Le mécanisme mis en jeu dans cet effet fait probablement appel à un phénomène d'adaptation visant à pallier les conséquences négatives de

Résumé

La méthode de mesure de la viscosité des extraits aqueux des matières premières et aliments utilisés en aviculture est décrite. Deux mesures sont effectuées, l'une où les enzymes endogènes sont désactivées par un prétraitement dans l'éthanol 80% à chaud, l'autre où aucun prétraitement n'est effectué ce qui permet l'expression des enzymes endogènes. La première détermination est appelée «viscosité potentielle», la deuxième «viscosité réelle». Les résultats sont exprimés en Logarithme de la viscosité relative rapporté à la concentration du matériel dans l'extrait. Cette expression est appelée «viscosité utile». Les viscosités utiles ont une répétabilité d'environ 5%. La viscosité utile potentielle (VUP) est additive. La VUP mesurée sur 26 types de matières premières montre de très larges variations entre les échantillons, les VUP les plus faibles étant observées pour le sorgho, le manioc, le pois et le maïs, et les plus élevées pour l'orge et le seigle. Pour les céréales, une bonne estimation de la VUP peut être obtenue par une extraction à pH 1,5 sans prétraitement éthanolique.

La température en sortie de presse affecte les valeurs de viscosité utile réelle (VUR), celles-ci ne pouvant être élevées que lorsque la température en sortie de presse (granulés de 2,5 mm) dépasse 90°C et lorsque la VUP est elle-même élevée. La granulométrie de broyage du matériel à extraire affecte fortement la VUR, les plus grossières conduisant aux plus faibles VUR. Il a pu être démontré que l'effet de la granulométrie n'est pas dû à l'activité des enzymes endogènes.

Vingt-sept régimes ont été testés sur des dindonneaux de chair de 5 semaines pour leur effet sur la consommation et l'excrétion d'eau. Des équations de régression multiple ont été calculées pour exprimer les consommations et excrétions d'eau rapportées à la consommation d'aliment en fonction des paramètres des régimes. Les meilleures équations contiennent les facteurs VUR et potassium, ou les facteurs VUP, température en sortie de granulose et potassium. Les valeurs de R² les plus élevées sont de 0,758. Les équations font apparaître que les facteurs explicatifs s'expriment les uns par rapport aux autres d'une manière non additive.

Figure 1. Additivité de la viscosité utile potentielle (VUP) testée sur résidus de traitement à l'éthanol 80 % à chaud. Les mélanges de résidus testés sont les suivants : blé/T. de soja, 50/50 ; blé/orge, 50/50 ; blé/seigle, 50/50 ; blé/pois, 50/50 ; T. de soja /seigle, 50/50 ; T. de soja/orge, 50/50 ; T. de soja/pois, 50/50 ; blé/T. de soja/pois, 55/30/15 ; pois/orge, 50/50 ; pois/seigle, 50/50 ; orge/seigle, 50/50.

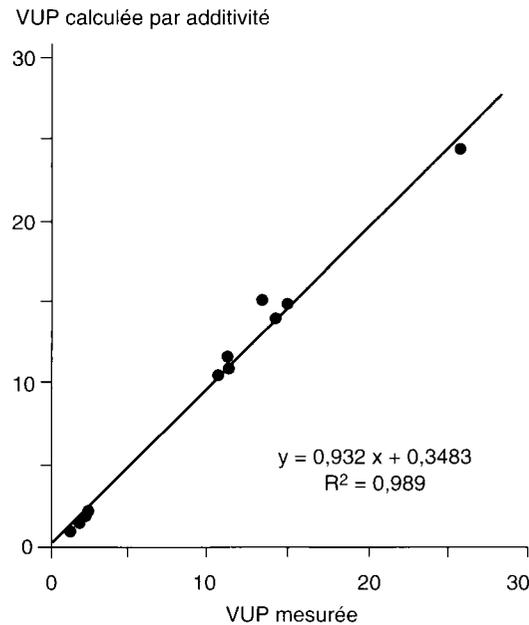
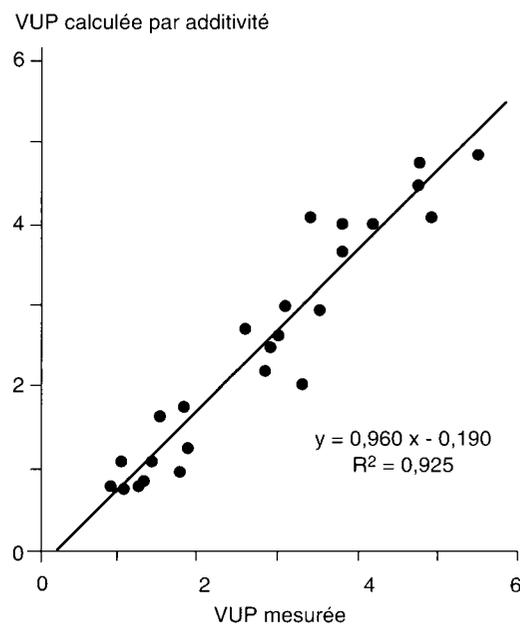


Figure 2. Additivité de la viscosité utile potentielle (VUP) testée sur 27 régimes granulés pour dindonneaux.



la viscosité sur les processus de digestion (revue de Carré 1992). Un des moyens d'adaptation de l'animal est en effet d'augmenter sa consommation d'eau, ce qui a pour effet de diluer les polysaccharides et de réduire la viscosité intra-intestinale.

Malgré la connaissance ancienne de cet effet de la viscosité, celle-ci n'a jamais pu être maîtrisée rationnellement par la formulation de l'aliment, aucune expérience, à notre connaissance, n'ayant été publiée jusqu'à présent pour relier d'une manière quantitative la viscosité de l'aliment aux consommations et excréments d'eau des oiseaux d'élevage en croissance. Les présentes expériences ont été menées pour combler ce manque d'information. Les animaux choisis pour ces expériences ont été des dindonneaux de chair de cinq semaines. Ce choix répond au besoin le plus aigu, les élevages de dindonneaux de chair étant plus particulièrement concernés par les problèmes de litière.

Détermination de la viscosité des aliments

Deux mesures sont effectuées pour caractériser la viscosité des aliments : la viscosité potentielle mesurée après un prétraitement par de l'éthanol 80 % à ébullition, et la viscosité réelle mesurée sans prétraitement préalable. Dans le premier cas, les enzymes endogènes sont inactivées préalablement à l'extraction aqueuse. Dans le deuxième, elles ne sont pas inactivées et peuvent s'exprimer dans l'extrait aqueux. Le choix du prétraitement éthanolique pour obtenir la viscosité potentielle a été fait dans l'esprit d'être applicable à toute matière première et régime. Il est aussi proposé une variante de simplification pour les céréales qui permet d'approcher les valeurs de viscosité potentielle sans avoir à effectuer un prétraitement éthanolique, l'extraction aqueuse étant réalisée dans ce cas à pH 1,5. Les méthodes sont décrites dans l'encadré ci-contre.

Les valeurs de viscosité relative ainsi obtenues sont transformées en leur Logarithme et rapportées à la concentration de l'échantillon dans l'extrait, ce qui permet de leur appliquer des calculs d'additivité (Bhatty *et al* 1991). Seule, la viscosité utile potentielle (VUP) a fait l'objet de calcul d'additivité, la viscosité utile réelle (VUR) ne pouvant être considérée comme additive du fait des activités enzymatiques pouvant agir d'un matériel sur l'autre. L'additivité des valeurs de VUP a été vérifiée en mélangeant des résidus éthanoliques de matières premières différentes (figure 1), et en testant les 27 régimes complexes pour dindonneaux (figure 2).

Les mesures de viscosité utile potentielle (VUP) ont été effectuées sur 54 échantillons de différentes matières premières utilisées en alimentation aviaire (tableau 1). La variabilité est très importante entre les matières premières et également à l'intérieur d'un type de matière première, le blé par exemple. Ces viscosités sont dues aux polysaccharides non amyliques hydrosolubles, étant donné que les traitements des extraits par de l' α -amylase pancréatique à pH 7 ou de la pepsine à pH 2 n'affectent pas les valeurs de VUP. Ces essais enzymatiques ont été réalisés sur des extraits

Mesure de la viscosité des aliments

La méthode consiste à effectuer une viscosimétrie d'un extrait aqueux de pH 4,5 sans (viscosité réelle) ou après un traitement préalable à l'éthanol (viscosité potentielle). Ce traitement à l'éthanol a pour but de désactiver les enzymes endogènes de l'échantillon.

Viscosité potentielle

Prétraitement éthanolique et extraction aqueuse :

L'échantillon (3,5 g) broyé préalablement sur une grille de 0,5 mm est traité dans 30 ml d'éthanol 80% à ébullition sous reflux pendant 1 heure. Après refroidissement, la suspension est laissée reposer pendant 16 h, centrifugée (5000 g, 15 min), le culot rincé par centrifugations par de l'éthanol 80%, puis de l'acétone. Le culot est dispersé, laissé sécher pendant 20 h, puis extrait à température ambiante (19-24° C) dans 30 ml de tampon acétate (pH 4,5) 0,2 M pendant 1 h sous agitation magnétique (300 rpm). La suspension est immédiatement centrifugée (1000 g, 15 min) et le surnageant filtré sous vide à travers une toile de nylon de 5 µm de taille de maille (Nytrel TI, 5SP - UGB 42360 Panissières). Le surnageant est ensuite mesuré en simple pour sa viscosité dans un délai de 10 à 120 min après la filtration. Le surnageant peut être congelé, décongelé, refiltré sur toile de nylon avant détermination de sa viscosité.

Détermination de la viscosité de l'extrait aqueux :

La viscosité de l'extrait est déterminée à température ambiante (19-24° C) à l'aide d'un viscosimètre rotatif à gradient de vitesse (s⁻¹) variable programmable (Rheomat 115A, Contravès, avec mobile MSO à double fente de 20 ml de contenance - Mettler).

Les viscosités sont déterminées d'après la courbe d'écoulement (Tension de cisaillement (mPa) en fonction du gradient de vitesse (s⁻¹))

obtenue avec 130 points lors de la phase de descente du gradient de vitesse, ce dernier évoluant d'abord en montée, puis en descente. Les gammes d'évolution du gradient de vitesse sont les suivantes : 25-800 s⁻¹ pour les viscosités de 0,95 à 2 mPa.s ; 10-400 s⁻¹ pour celles de 2 à 5 mPa.s ; 0,1-40 s⁻¹ pour celles supérieures à 5 mPa.s. Pour la gamme 25-800 s⁻¹, la viscosité est égale à la pente de la régression linéaire. Pour les autres gammes, la courbe est testée en régressions linéaire et polynomiale (X, X²). Si cette dernière est statistiquement significative (P < 0,05) pour le coefficient de X², le coefficient de X représente la viscosité ; si elle n'est pas significative pour le coefficient de X², c'est la pente de la régression linéaire qui représente la viscosité. Les gammes de gradient de vitesse et les calculs sont effectués de manière à ce que les chiffres de viscosité obtenus correspondent le plus possible à des conditions newtoniennes, les conditions newtoniennes garantissant une meilleure cohérence dans les calculs appliqués aux chiffres de viscosité.

Viscosité réelle

L'extraction aqueuse est effectuée à pH 4,5 comme précédemment, mais sans prétraitement à l'éthanol. Les enzymes endogènes de l'échantillon peuvent s'exprimer. L'extrait est mesuré en simple dans un délai de 10 à 60 min après la filtration. L'extrait peut être congelé et décongelé et refiltré avant viscosimétrie. La viscosimétrie s'effectue de la même façon que pour la mesure de la viscosité potentielle.

Expression des résultats de viscosité

Viscosité relative (η_r) = viscosité (extrait) / viscosité (tampon)

Viscosité utile (VU) = Log (η_r) / (concentration (g/ml) du matériel de départ dans l'extrait final)

La répétabilité de la viscosité utile potentielle (VUP) évaluée à l'aide de matières premières (4 échantillons, 5 répétitions) dont la VUP varie de 2,0 à 27 est estimée à environ 5 %. La répétabilité de la viscosité utile réelle (VUR), évaluée à l'aide de régimes (4 échantillons, 3 répétitions) dont la VUR varie de 1,3 à 3,2, est estimée à environ 6 %.

Variante simplifiée pour les céréales

La méthode proposée ci-dessus (pour la VUP) a été conçue pour toute matière première et régime. Elle peut être simplifiée si l'on ne s'intéresse qu'aux céréales. Pour le cas des céréales une approche satisfaisante de la VUP peut être obtenue en effectuant une extraction directe de 1 h à pH 1,5 (HCl) et température ambiante, sans traitement éthanolique préalable, le pH acide bloquant l'activité des enzymes endogènes. Par exemple, pour un échantillon de blé présentant une VUP de 4,54, une extraction à pH 1,5 (1 h, température ambiante) sans prétraitement éthanolique aboutit à une viscosité utile de 4,81, chiffre qui ne s'écarte donc que de 6% de la valeur de référence. Le pH acide,

quand bien même celui-ci entraînerait une hydrolyse partielle des ramifications latérales d'arabinose, ne modifie pas sensiblement la viscosité. Ceci a été vérifié sur des résidus éthanoliques de seigle et de blé extraits soit à pH 1,5 soit à pH 4,5 : à pH 1,5 les viscosités utiles étaient de 2,70 et 21,26 et à pH 4,5 de 2,63 et 21,48 respectivement. Ces résultats sont en bon accord avec ceux de Mc Cleary *et al* (1981) montrant que l'hydrolyse partielle des ramifications latérales d'un galactomannane en solution ne modifie pas la viscosité de la solution. L'extraction acide directe est un procédé classiquement utilisé pour la mesure de la viscosité des orges (Aastrup 1979, Bhatti 1987).

Tableau 1. Valeurs de viscosité utile potentielle (VUP : $\text{Log}(\eta_r) \cdot g^1 \cdot ml$) rapportées à la matière sèche observées dans quelques matières premières utilisées en alimentation aviaire.

Maïs	0,60
Sorgho	0,26
Blé	1,64 - 5,16 (6)
Orge	18,45 - 20,39 (2)
Avoine	13,22
Triticale	2,77 - 7,27 (4)
Seigle	27,21
Manioc	0,36
Pois	0,33 - 1,54 (19)
Féverole	1,47
Luzerne (19 % N x 6,25)	2,35
PX	0,42
Gluten de maïs	0,28
T. soja 48	2,05
T. colza	1,33
T. tournesol	1,44
Graine entière de soja toastée	1,42
Graine entière de colza	0,75
Graine entière de tournesol	0,60
Coques de soja	5,88
Coque de tournesol	1,02
Pellicules de colza	1,64
Remoulage de blé	4,52
Son de blé	2,94 - 3,66 (2)
Corn gluten feed	1,30
Corn distiller	3,74

Lorsque plusieurs échantillons d'origines diverses ont été testés, l'intervalle de variations est indiqué avec le nombre d'échantillons entre parenthèses.

aqueux de résidus éthanoliques de seigle, orge, blé, tourteau de soja, et pois. Des utilisations similaires d'enzymes aboutissant à des observations de même type avaient déjà été effectuées sur l'orge par Bhatti *et al* (1991). La faible valeur pour le maïs et les fortes valeurs pour l'orge et le seigle sont en bon accord avec les données de Nyman *et al* (1984) montrant des teneurs en polysaccharides non amylacés hydrosolubles beaucoup plus élevées dans l'orge et le seigle que dans le maïs.

Facteurs technologiques affectant la viscosité utile réelle (VUR)

La viscosité réelle peut être très inférieure à la viscosité potentielle du fait de la non désactivation des enzymes endogènes avant extraction. Ainsi, des blé, triticale et orge ayant des VUP respectives de 2,13, 4,21 et 16,24 présentent des VUR de 1,19, 3,11 et 3,74, respectivement.

Toutefois, si les aliments ont subi des traitements technologiques désactivant tout ou par-

tie des enzymes endogènes, comme cela peut être le cas avec la granulation (Inbarr et Bedford 1994), on peut supposer que la VUR peut se rapprocher de la VUP. Ce phénomène a pu être mis en évidence par l'examen des 27 régimes pour dindonneaux ayant subi une température de granulation (granulés de 2,5 mm) différente d'un aliment à l'autre. Pour ces 27 régimes, les températures en sortie de presse variaient de 68 à 100° C, les VUP de 0,91 à 5,52 et les VUR de 0,83 à 4,49. Il apparaîtrait nettement que c'est à partir de 90-91° C que des valeurs élevées de VUR commencent à apparaître. En effet, pour des températures inférieures à 91° C, les VUR ne dépassent pas 1,81 bien que la VUP atteigne parfois 3,8. En contrepartie, pour des températures supérieures ou égales à 91° C, les VUP comprises entre 3 et 3,5 engendrent des VUR de 2,1 à 3. Cette observation, illustrée par la figure 3, met en évidence une température plancher de 91° C (en sortie de presse) pour l'expression de la VUP en VUR.

L'effet de la température en sortie de presse a été matérialisé également à l'aide de 4 régimes granulés selon deux modes, les températures de sortie étant dans un cas de 68-74°C et, dans l'autre cas, de 94-98°C. Les VUR à basse température étaient de 0,83, 0,87, 1,62 et 1,51 ; à forte température elles étaient respectivement de 1,28, 1,29, 3,70 et 2,53. L'effet en palier de la température sur la VUR peut s'exprimer d'une manière continue à l'aide du terme $(VUP \times t)^2$ qui explique 86 % de la variation de VUR, au lieu de 72 % d'explication avec le simple terme VUP (figure 4).

Il est probable que la température plancher enregistrée en sortie de presse dépend du diamètre de section du granulé, étant donné que les températures vont en diminuant vers le centre du granulé. Pour les gros granulés, la température au centre sera plus faible par rapport à la température moyenne, ce qui exigera une température moyenne plus élevée pour que le centre du granulé atteigne la température plancher.

La viscosité utile réelle ne peut donc être élevée que s'il existe à la fois une viscosité utile potentielle élevée et une température de traitement technologique suffisamment élevée pour dénaturer les enzymes endogènes de l'aliment.

L'interaction entre la technologie appliquée à l'aliment et la viscosité de leurs extraits bruts nous a conduit à nous interroger quant à l'effet de la granulométrie de broyage sur la viscosité des extraits, avec l'arrière pensée qu'un test *in vitro* pourrait donner de nouvelles idées quant au type de traitement technologique à appliquer à l'aliment. Nous avons donc réalisé des cinétiques de développement de la viscosité réelle avec des céréales broyées sur une grille de 0,5 mm ou 3 mm. Une cinétique a également été construite avec des échantillons broyés à 3 mm extraits pendant 30 min, puis broyés à bille (échantillon dans l'extrait) pendant 5 min et repris pour la cinétique.

De l'examen des cinétiques (figure 5), il ressort que la viscosité réelle des extraits est tou-

Figure 3. Mise en évidence d'une température plancher (température de sortie de granuleuse) pour l'expression de la viscosité utile réelle (VUR), observée lors de la fabrication de granulés de 2,5 mm.

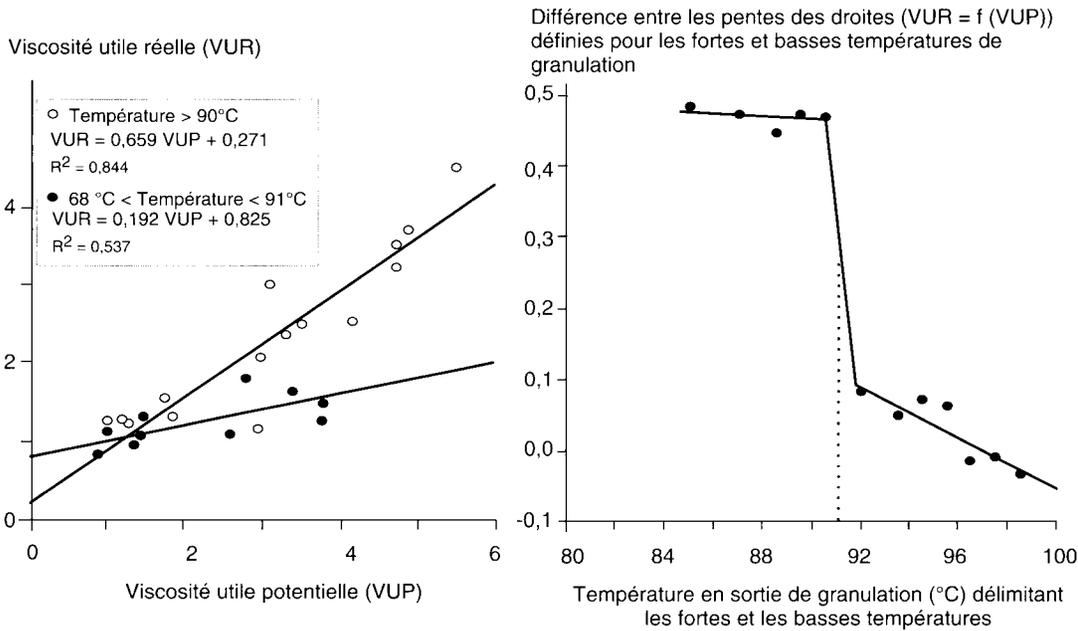
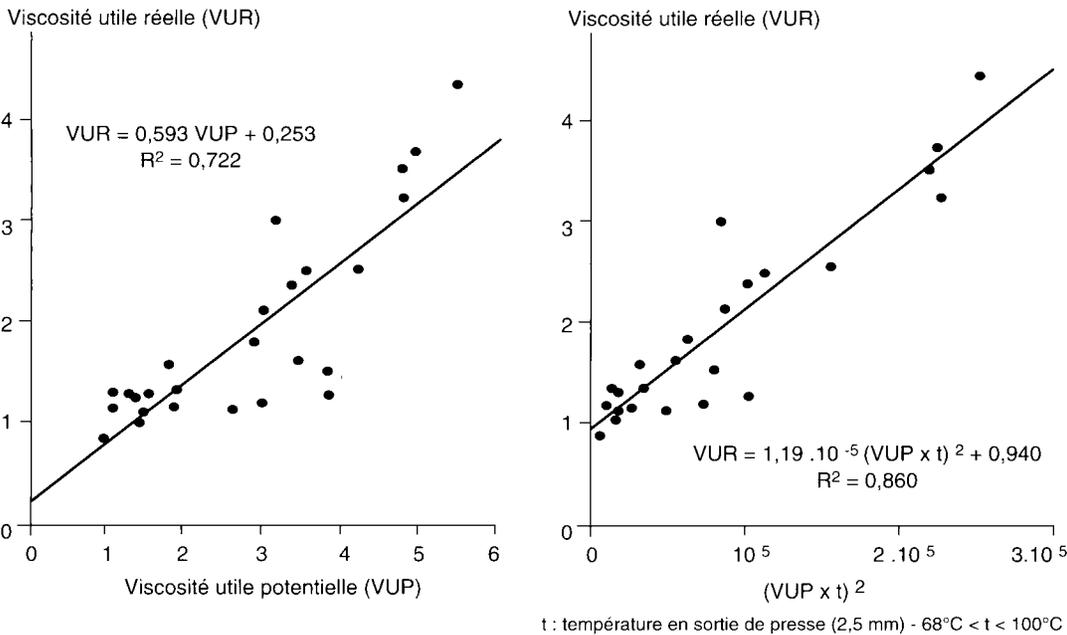


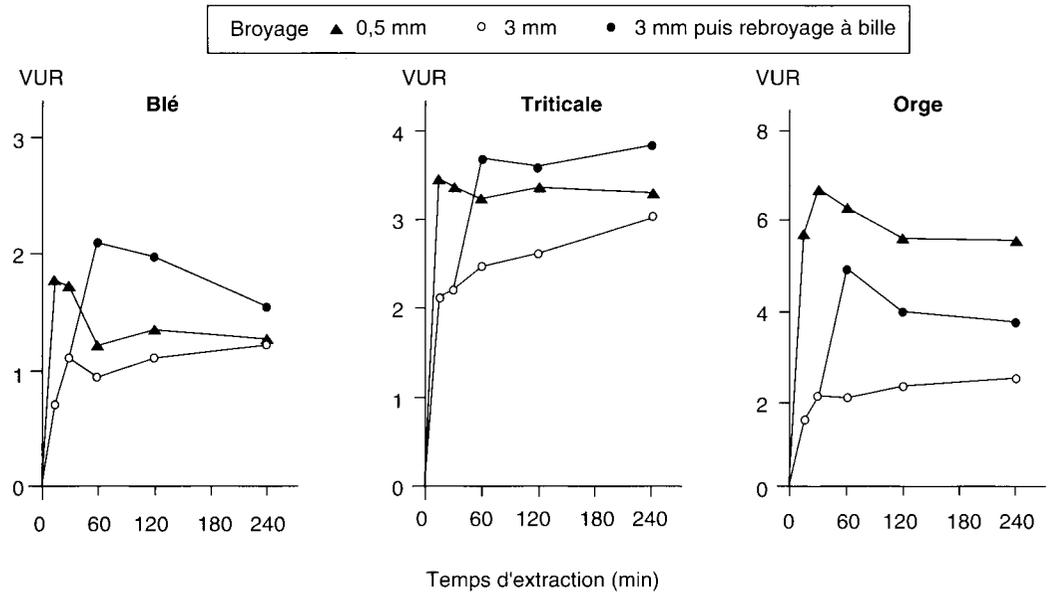
Figure 4. Relations entre les viscosités utiles réelle (VUR) et potentielle (VUP) observées avec 27 régimes granulés.



jours la plus faible pour le broyage le plus grossier, et ce même après 4 h d'extraction. De plus, la comparaison avec le broyat grossier rebroyé montre que la faible valeur observée avec le broyat grossier ne résulte pas d'une disparition de la viscosité par une activité enzymatique éventuelle, mais simplement de la non-expression de la viscosité. En terme nutritionnel, si un effet bénéfique d'un broyage grossier (ou d'une absence de broyage) était à attendre, il viendrait d'une dilution dans le

temps de la distribution de la viscosité dans l'intestin grêle et non de la réduction de l'apport total de viscosité. En effet, si les animaux sont amenés à s'alimenter d'une manière discontinue avec remplissage rapide du jabot et du gésier, selon la granulométrie de broyage, deux scénarios sont envisageables : si la farine est fine, la viscosité dans le gésier va s'exprimer complètement et rapidement ; dans ce cas le bol alimentaire passant dans l'intestin grêle va afficher une forte viscosité au

Figure 5. Effet de l'intensité de broyage sur la viscosité des extraits aqueux des céréales (température ambiante, pH 4,5, sans prétraitement éthanolique).



début de la vidange gastrique, puis, éventuellement, une viscosité diminuant au cours du temps par le jeu de la dilution aqueuse. Si la farine est grossière, la viscosité va résulter à la fois d'une fraction non encore broyée (à faible viscosité) et d'une fraction finement broyée par le gésier (à forte viscosité) mais de quantité limitée, celle-ci étant vidangée régulièrement. Dans ce dernier cas, il en résultera une viscosité moyenne du contenu du gésier plus faible mais se maintenant d'une manière plus constante puisque délivrée d'une manière régulière par le broyage de l'aliment dans le gésier.

Mesure de l'eau retenue par les parois végétales

La méthode consiste à mesurer l'eau retenue par les parois végétales isolées soumises à la force gravitationnelle. Les parois végétales sont isolées selon la méthode de Carré et Brillouet (1989), l'étape de séchage final à 104°C étant éliminée. Les parois isolées et humidifiées sont déposées sur un filtre de toile de nylon de 5 µm de taille de maille, rincées par de l'eau distillée sous filtration passive et laissées sous filtration passive pendant 1 min. L'eau adhérente au dessous de la toile est éliminée par 4 dépositions successives de la toile sur une surface lisse en verre. La teneur en eau du résidu pariétal humide est ensuite déterminée par séchage à 104°C pendant 4 heures. La répétabilité de la méthode est de 3%. La quantité d'eau retenue par les parois (Eau PAR, g/kg) est obtenue en multipliant la rétention d'eau pariétale par la teneur en parois végétales.

Effet de la viscosité des régimes sur la consommation et l'excrétion d'eau chez le dindonneau

Description de l'expérience

L'effet de la viscosité des régimes a été testé chez des dindonneaux de chair mâles (souche "Betiboul" Doux-Stanven-Bétina) de cinq semaines élevés en cages individuelles à 21°C avec 16 h de lumière par jour (de 29 à 37 jours d'âge), à l'aide de 27 régimes expérimentaux granulés (2,5 mm) distribués à partir de 29 jours d'âge. Avant de recevoir les aliments expérimentaux, les dindonneaux, maintenus dans les mêmes cages individuelles, recevaient un régime granulé (2,5 mm) contenant 29,6 % de protéines et 2970 kcal/kg (énergie métabolisable corrigée pour un bilan azoté nul : EMAn).

L'expérience a consisté en un bilan de 48 h mené à partir du 35^{ème} jour avec 8 animaux par régime. Le bilan commençait et finissait précisément au moment de l'allumage de la lumière. Les consommations individuelles d'aliment et d'eau et l'excrétion individuelle d'eau ont été enregistrées durant le bilan. L'excrétion d'eau a été mesurée par collecte totale des excreta deux fois par jour, pesée et congélation immédiate, et mesure de la perte d'eau des excreta lors de la lyophilisation du total des excreta.

Les 27 régimes expérimentaux granulés (2,5 mm) étaient formulés pour contenir 24,2 % de protéine, 2900 kcal/kg d'énergie métabolisable (EMAn), 1,5 % de lysine, 0,95 % de

Tableau 2. Matières premières utilisées dans les régimes.

	Domaine de variation (%)	Nombre de régimes concernés
Mais	11,2 - 42,5	14
Blé	9,5 - 42,5	12
Sorgho o tanin	4,8 - 51,0	5
Triticale	1,9 - 47,4	9
Orge	1,9 - 17,0	16
Avoine	4,8 - 20,1	2
Manioc	4,4 - 33,2	9
Pois	5,3 - 19,4	3
Amidon de maïs	31,3	1
T. soja 48	5,0 - 32,1	26
T. colza	4,9 - 7,0	11
T. tournesol	6,5 - 8,0	8
Graine ent. soja toasté	0,6 - 10,0	21
Graine ent. colza	1,9 - 6,0	6
Graine ent. tournesol	1,9 - 10,1	10
Luzerne (19 % N x 6,25)	1,4 - 7,5	5
Son de blé	2,7 - 8,0	4
Corn gluten feed	1,9	1
Corn distiller	1,9 - 4,0	3
PX	0,2 - 3,0	11
Gluten de maïs	0,2 - 10,0	23
Isolat de soja	2,0 - 9,7	18
Farine viande 55G	4,8 - 7,0	7
Farine viande 60D	2,9 - 7,0	18
Paille	0,3 - 6,3	15
Gomme de guar	0,24	1
Huile de colza	1,5 - 4,9	26

méthionine + cystine, 1,4 % de calcium et 0,6 % de phosphore disponible. Tous les régimes étaient supplémentés en oligo-éléments, vitamines et anticoccidien (Robenz à 0,05 %). Vingt sept matières premières différentes ont été utilisées (tableau 2). Les facteurs de variation recherchés entre les régimes étaient la VUP et les teneurs en cendres, potassium, parois végétales et lipides. Parmi les 27 régimes, la technique de granulation a également fait l'objet de régimes spécifiques avec 4 régimes granulés soit à basse température (68-74° C en sortie de granuleuse) soit à forte température (94-98° C).

Les 27 régimes ont été granulés avec une introduction de vapeur à 140° C dans le conditionneur, la température de l'aliment avant la filière se situant entre 60 et 65° C. La filière utilisée était de 2,5 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur sauf pour les régimes n° 20, 22, 24 et 26 pour lesquels l'épaisseur était de 25 mm. La température à la sortie du conditionneur était contrôlée à l'aide d'une sonde à thermocouple. A la sortie de la granuleuse, la température était mesurée dans un vase Dewar.

Le potassium et le sodium ont été mesurés par spectrométrie de flamme sur les cendres dissoutes dans l'acide chlorhydrique 10 %, les viscosité et eau pariétale retenue comme décrit plus haut, les teneurs en parois végétales selon Carré et Brillouet (1989) et les lipides

selon la méthode européenne A sans prétraitement acide (AFNOR 1985). La dureté des granulés a été déterminée selon Delort-Laval et Drevet (1970). L'EMAn a été vérifiée par calcul selon l'équation PAR₂ basée sur les lipides A, les cendres, les parois et la matière sèche (Carré et Rozo 1990).

Effet des régimes

Le poids moyen des animaux était de 1737 g au moment du bilan sans observation d'effet significatif des régimes (test par analyse de variance).

Lors du bilan, un léger effet ($P = 0,0300$) des régimes a été enregistré sur la consommation journalière d'aliment (écart type résiduel : 20,6g). Cette dernière a varié, selon les régimes, de 147 à 184 g. Le ratio eau consommée / aliment consommé (écart type résiduel : 0,487) a varié significativement ($P = 0,0001$) selon les régimes, entre 1,68 et 2,97 (tableau 3). Le ratio eau excrétée / aliment consommé (écart type résiduel : 0,310) a également été significativement ($P = 0,0001$) affecté par les régimes, avec une variation comprise entre 0,86 et 1,74 (tableau 3).

Equations de prédiction

Les moyennes des ratios eau consommée / aliment consommé et eau excrétée / aliment consommé ont été reliées à la composition des régimes (tableau 3) par calcul de régression linéaire multiple. Dans ces calculs, les interactions avec les variables les plus prédictives VUR et VUP (tableau 4) ont été systématiquement testées. Les équations les plus efficaces sont présentées dans le tableau 5. Toutes contiennent les variables VUR ou VUP, ces deux dernières se détachant nettement de toutes les autres pour ce qui concerne leur efficacité de prédiction (tableau 4). Les équations basées sur la variable VUR sont toujours plus efficaces que celles basées sur VUP (tableau 5), ce qui atteste que les enzymes endogènes de l'aliment sont probablement actives dans le tractus digestif des animaux.

Les régressions simples (basées sur les valeurs individuelles), fonctions de la variable VUR, expliquant la consommation ou l'excrétion d'eau rapportées à l'ingéré ont été examinées en faisant intervenir un nombre croissant d'aliment dans l'ordre croissant des valeurs de VUR. Ces régressions deviennent significatives ($P < 0,05$) à partir des valeurs de VUR de 1,8 et 2,5, respectivement. Ces valeurs, relativement faibles, témoignent de la sensibilité des dindonneaux à la viscosité de la fraction soluble.

Les interactions quadratiques qui interviennent dans les équations (tableau 5) illustrent la non additivité des facteurs explicatifs, ceux-ci s'exprimant les uns par rapport aux autres comme des facteurs limitants. C'est le cas du terme $(VUP \times \text{température})^2$ (tableau 5), terme prédictif de VUR (voir plus haut). C'est aussi le cas du potassium qui intervient comme modulateur des pentes affectées à

Tableau 3. Composition des régimes (granulés de 2,5 mm), consommation et excrétion d'eau rapportées à la consommation d'aliments (dindonneaux de 5 semaines).

Numéro des régimes	N x 6,25 (%)	Lipides A (%)	PAR (%)	Eau PAR (g/kg)	Cendres (%)	Sodium (%)	Potassium (%)	Viscosité utile potentielle (g'.ml)	Viscosité utile réelle (g'.ml)	Matière sèche (%)	EMAn prédite (k cal/kg)	Durété des granulés (MPa)	Température de sortie de granuleuse (°C)	Eau consommée/aliment consommé	Eau excrétée/aliment consommé
1	24,6	6,3	13,7	1005	7,3	0,12	0,89	3,1	3,0	89,8	2875	4,40	93	2,02	1,16
2	25,0	6,5	13,3	1041	7,3	0,12	0,89	4,8	3,5	90,2	2917	2,74	98	2,36	1,27
3	24,9	6,9	12,1	1043	8,1	0,12	1,04	1,3	1,3	90,7	2967	3,66	99	2,22	1,22
4	25,4	7,6	13,5	1173	7,7	0,11	1,04	1,8	1,2	88,7	2883	2,05	86	1,95	1,05
5	23,1	4,5	13,2	1090	7,4	0,23	0,78	4,8	3,2	90,2	2823	4,02	100	2,33	1,26
6	23,8	8,2	16,0	1126	7,2	0,21	0,68	1,4	1,1	89,8	2869	2,90	90	1,96	1,02
7	25,3	6,8	14,9	1066	7,0	0,22	0,71	3,0	1,2	89,5	2849	2,25	91	1,83	0,89
8	24,9	8,1	12,8	1278	7,2	0,13	0,98	2,6	1,1	88,9	2971	1,77	84	1,95	1,01
9	26,1	9,1	17,1	1154	7,4	0,14	0,91	3,8	1,3	90,6	2882	1,37	84	1,86	0,86
10	24,4	6,1	11,2	783	7,3	0,14	0,84	1,8	1,6	90,0	2988	3,06	100	1,96	0,92
11	24,9	8,5	12,8	1218	7,5	0,15	0,93	1,5	1,3	88,6	2961	0,97	84	1,71	0,86
12	24,2	6,1	11,2	859	8,4	0,15	1,02	3,5	2,5	90,0	2920	2,90	95	2,36	1,25
13	24,2	6,6	11,8	1096	8,9	0,20	1,06	3,0	2,1	89,6	2883	2,29	97	2,41	1,23
14	24,0	5,6	13,2	976	7,6	0,24	0,89	3,3	2,4	89,9	2853	2,78	96	1,96	1,01
15	24,7	7,1	15,9	1158	7,7	0,23	0,80	1,9	1,3	90,1	2811	2,18	98	1,89	0,96
16	24,6	7,7	15,7	1193	7,2	0,24	0,67	1,1	1,2	89,9	2862	1,98	89	1,92	0,93
17	24,2	8,1	16,5	1200	7,6	0,22	0,89	2,8	1,8	90,4	2847	1,92	88	2,23	1,14
18	24,7	7,7	14,7	1178	7,4	0,19	0,96	5,5	4,5	90,2	2905	1,81	91	2,53	1,33
19	24,3	6,4	14,0	1059	6,5	0,18	0,60	1,3	1,3	90,3	2928	2,79	98	1,68	0,95
20	23,9	6,3	13,9	1193	6,5	0,18	0,59	0,9	0,8	87,8	2828	0,62	68	1,72	0,99
21	24,7	6,1	12,4	1001	7,2	0,23	0,68	1,1	1,3	90,0	2936	2,30	98	2,23	1,28
22	24,7	6,0	12,4	1155	7,2	0,23	0,69	0,9	0,9	88,3	2865	0,49	71	1,73	0,88
23	24,5	7,1	15,1	1125	6,8	0,17	0,67	4,9	3,7	90,4	2906	2,17	96	2,97	1,74
24	24,5	6,9	15,1	1346	6,7	0,17	0,65	3,4	1,6	87,9	2798	0,58	68	2,15	1,26
25	24,9	5,9	13,0	1054	7,2	0,22	0,70	4,2	2,5	89,6	2891	1,96	94	2,31	1,35
26	24,5	5,9	13,0	1082	7,0	0,21	0,69	3,8	1,5	88,6	2859	0,66	74	1,95	1,05
27	24,4	8,2	15,9	1203	6,9	0,24	0,67	1,4	1,0	88,9	2854	1,36	86	1,96	1,10

VUR ou (VUP x température)². Il faut ici noter que la non additivité des effets des ions et de la viscosité sur l'excrétion d'eau avait déjà été observée dans le passé (Lee et Campbell 1983).

De ces régressions, on peut conclure que la viscosité utile réelle est le principal facteur explicatif, celui-ci pouvant être indirectement exprimé par la viscosité utile potentielle et la température du traitement. Le potassium intervient comme second facteur, la viscosité utile réelle s'exprimant d'autant plus significativement que la teneur en potassium est faible.

Conclusions

L'étude a montré qu'il était pratiquement possible de maîtriser en partie la consommation et l'excrétion d'eau des dindonneaux en

croissance à travers la formulation additive de l'aliment et le contrôle des traitements technologiques qui leur sont appliqués. Le principal facteur explicatif est la viscosité de l'extrait aqueux de l'aliment, le potassium intervenant également mais secondairement. Les traitements technologiques à haute température interviennent probablement par l'inactivation des enzymes endogènes de l'aliment, cette inactivation ayant pour conséquence de permettre l'expression des viscosités induites par les polysaccharides non amyliques hydrosolubles.

Les hautes températures des traitements technologiques peuvent donc présenter des inconvénients en nutrition aviaire en inactivant les enzymes endogènes de l'aliment, bénéfiques lorsqu'ils sont capables d'hydrolyser des facteurs antinutritionnels, tels les polysaccharides non amyliques hydrosolubles, responsables des viscosités des fractions solubles. Il

Tableau 4. Matrice de corrélation.

	Y1	Y2	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
Eau conso./Alt conso. Y1	1	0,941	-0,169	-0,153	-0,079	-0,139	0,273	-0,065	0,222	0,685	0,777	0,443	0,099	0,286	0,416
Eau Excr./Alt conso Y2	0,941	1	-0,216	-0,239	-0,096	-0,066	0,075	-0,067	0,036	0,595	0,713	0,282	0,044	0,235	0,303
N*6,25. X1	-0,169	-0,216	1	0,517	0,189	0,156	-0,005	-0,404	0,251	0,001	-0,190	0,041	0,271	-0,283	-0,114
Lipides A. X2	-0,153	-0,239	0,517	1	0,608	0,547	-0,019	-0,211	0,193	-0,184	-0,280	0,015	0,135	-0,342	-0,214
PAR. X3	-0,079	-0,096	0,189	0,608	1	0,567	-0,387	0,272	-0,339	0,057	-0,078	0,136	-0,541	-0,232	-0,202
Eau PAR. X4	-0,139	-0,066	0,156	0,547	0,567	1	-0,304	0,114	-0,172	-0,068	-0,224	-0,458	-0,408	-0,606	-0,613
Cendres. X5	0,273	0,075	-0,005	-0,019	-0,387	-0,304	1	-0,130	0,813	0,096	0,148	0,333	0,199	0,346	0,423
Sodium. X6	-0,065	-0,067	-0,404	-0,211	0,272	0,114	-0,130	1	-0,544	-0,105	-0,114	-0,024	-0,549	-0,212	-0,029
Potassium. X7	0,222	0,036	0,251	0,193	-0,339	-0,172	0,813	-0,544	1	0,228	0,242	0,280	0,411	0,323	0,322
Visco.Utile Pot. X8	0,685	0,595	0,001	-0,184	0,057	-0,068	0,096	-0,105	0,228	1	0,850	0,314	-0,114	0,155	0,196
Visco.Utile réelle X9	0,777	0,713	-0,190	-0,280	-0,078	-0,224	0,148	-0,114	0,242	0,850	1	0,436	0,038	0,389	0,417
Mat. sèche. X10	0,443	0,282	0,041	0,015	0,136	-0,458	0,333	-0,024	0,280	0,314	0,436	1	0,289	0,681	0,835
EMAn prédite. X11	0,099	0,044	0,271	0,135	-0,541	-0,408	0,199	-0,549	0,411	-0,114	0,038	0,289	1	0,249	0,391
Dureté Gran. X12	0,286	0,235	-0,283	-0,342	-0,232	-0,606	0,346	-0,212	0,323	0,155	0,389	0,681	0,249	1	0,818
Temp. sort. Fil. X13	0,416	0,303	-0,114	-0,214	-0,202	-0,613	0,423	-0,029	0,322	0,196	0,417	0,835	0,391	0,818	1

Tableau 5. Equations (n=27) exprimant les ratios Eau consommé / Aliment consommé (Y₁) et Eau excrétée / Aliment consommé (Y₂) en fonction des viscosités utiles réelles (X₁) et potentielles (X₂), de la température en sortie de granuleuse (granulés 2,5 mm) (X₃) et de la teneur en potassium des régimes (X₄), pour des dindonneaux de 5 semaines.

Y ₁ = 0,236 X ₁ + 1,64	Ec. Ty Rés. = 0,19. R ² = 0,588
Y ₁ = 2,91 x 10 ⁻⁶ X ₂ ² X ₃ ² + 1,86	Ec. Ty Rés. = 0,20. R ² = 0,540
Y ₁ = (3,41 X ₄ ² - 6,36 X ₄ + 3,14) X ₁ + 1,16 X ₄ + 0,63	Ec. Ty Rés. = 0,15. R ² = 0,758
Y ₁ = (9,50 x 10 ⁻² X ₄ ² - 1,60 x 10 ⁻⁴ X ₄ + 6,89 x 10 ⁻⁵) X ₂ ² X ₃ ² + 1,83	Ec. Ty Rés. = 0,16. R ² = 0,693
Y ₂ = 0,146 X ₁ + 0,84	Ec. Ty Rés. = 0,14. R ² = 0,489
Y ₂ = 1,74 x 10 ⁻⁶ X ₂ ² X ₃ ² + 0,98	Ec. Ty Rés. = 0,15. R ² = 0,411
Y ₂ = (2,78 X ₄ ² - 5,16 X ₄ + 2,50) X ₁ + 0,66 X ₄ + 0,23	Ec. Ty Rés. = 0,10. R ² = 0,759
Y ₂ = (6,53 x 10 ⁻² X ₄ ² - 1,12 x 10 ⁻⁴ X ₄ + 4,92 x 10 ⁻⁵) X ₂ ² X ₃ ² + 0,96	Ec. Ty Rés. = 0,12. R ² = 0,619

0,83 ≤ X₁ ≤ 4,49 (Log. (ηr) . g⁻¹. ml) ; 0,91 ≤ X₂ ≤ 5,52 (Log (ηr) . g⁻¹. ml) ;
68 ≤ X₃ ≤ 100°C ; 0,59 ≤ X₄ ≤ 1,06 %

est important de noter que, bien souvent, ce sont des céréales qui sont à l'origine des viscosités élevées et qui, donc, perdent à subir des traitements technologiques. On retrouve donc, avec les céréales, une situation inverse de celle observée avec d'autres matières premières comme le pois qui, au contraire, gagnent à être traitées thermomécaniquement (Carré *et al* 1987, Conan et Carré 1989, Carré *et al* 1991). Il apparaît donc qu'une utilisation optimum des matières premières passe parfois par des traitements spécifiques, et qu'un traitement unique appliqué à l'aliment entier est parfois inadapté. Un traitement séparé de fractions avant mélange du total pourrait, dans certains cas comme celui d'une association blé/pois, s'avérer plus efficace.

Remerciements

La présente étude a été réalisée avec le soutien financier du Fonds SYPRAM (fonds constitués par les adhérents de l'Association pour le Maintien de l'Élevage en Bretagne (AMEB), du Syndicat National des Industriels de la Nutrition Animale (SNIA), et de la Fédération Nationale des Coopératives de Production et d'Alimentation Animales (SYNCOPAC)) et du CRITT Valicentre (Projet SYPRAM N°11, Mars 1992 - Mars 1994), commanditaires du projet.

Nous remercions les représentants des firmes et coopératives de fabrication d'aliment participant au Fonds SYPRAM pour leurs rôles de conseil. Nous adressons également nos remerciements à D. Guibert (L.T.A.N., INRA de Nantes) pour sa participation dans les travaux concernant l'évaluation de la dureté des granulés d'aliment. Toute reproduction totale ou partielle doit faire mention des commanditaires de l'étude et de l'origine de son financement.

Références bibliographiques

- Aastrup S., 1979. The relationship between the viscosity of an acid flour extract of barley and its β -glucan content. *Carlsberg Res. Commun.*, 44, 289-304
- AFNOR, 1985. Aliments des animaux : méthodes d'analyse françaises et communautaires. Paris-La Défense
- Bhatty R.S., 1987. Relationship between acid extract viscosity and total, soluble, and insoluble β -glucan contents of hulled and hullless barley. *Can. J. Plant. Sci.*, 67, 997-1008
- Bhatty R.S., Mac Gregor A.W., Rosnagel B.G., 1991. Total and acid-soluble β -glucan content of hullless barley and its relationship to acid-extract viscosity. *Cereal Chem.*, 68, 221-227
- Carré B., 1992. Les polysaccharides non amylacés hydrosolubles. In : «Les contaminants et facteurs antinutritionnels dans les aliments des volailles : vrais ou faux problèmes». Comptes rendus de la Conférence Avicole W.P.S.A. - S.I.M.A.V.I.P., 3 mars 1992. pp. 51-58. W.P.S.A. - France, 37380 Nouzilly
- Carré B., Brillouet J.M., 1989. Determination of water insoluble cell walls in feeds: interlaboratory study. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, 72, 463-467
- Carré B., Rozo E., 1990. La prédiction de la valeur énergétique des matières premières destinées à l'aviculture. *INRA Prod. Anim.*, 3, 163-169
- Carré B., Escartin R., Melcion J.P., Champ M., Roux G., Leclercq B., 1987. Effect of pelleting and associations with maize or wheat on the nutritive value of smooth pea (*Pisum sativum*) seeds in adult cockerels. *Brit. Poult. Sci.*, 28, 219-229
- Carré B., Beaufile E., Melcion J.P., 1991. Evaluation of protein and starch digestibilities and energy value of pelleted or unpelleted pea seeds from winter or spring cultivars in adult and young chickens. *J. Agric. Food Chem.*, 39, 468-472
- Conan L., Carré B., 1989. Effect of autoclaving on metabolizable energy value of smooth pea seed (*Pisum sativum*) in growing chicks. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 26, 337-345
- Delort-Laval J., Drevet S., 1970. Méthode d'appréciation de la dureté des aliments agglomérés. *Ind. Alim. Anim.*, 213, 43-54.
- Gohl B., Alden S., Elwinger K., Thomke S., 1978. Influence of β -glucanase on feeding value of barley for poultry and moisture content of excreta. *Br. Poultry Sci.*, 19, 41-47
- Inbarr J., Bedford M.R., 1994. Stability of feed enzymes to steam pelleting during feed processing. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 46, 179-196
- Lee B.D., Campbell L.D., 1983. Influence of rye and dietary salt level on water and sodium metabolism in intact and colostomized roosters. *Poultry Sci.*, 62, 472-479
- Mc Cleary B.V., Amado R., Waihel R., Neukom H., 1981. Effect of galactose content on the solution and interaction properties of guar and carob galactomannans. *Carbohydrate Res.*, 92, 269-285
- Moran E.T., Lall S.P., Summers J.D., 1969. The feeding value of rye for the growing chick: effect of enzyme supplements, antibiotics, autoclaving and geographical area of production. *Poultry Sci.*, 48, 939-949
- Nyman M., Siljeström M., Pedersen B., Bach Knudsen K.E., Asp N.G., Johansson C.G., Eggum O., 1984. Dietary fiber content and composition in six cereals at different extraction rates. *Cereal Chem.* 61, 14-19
- Smith M.O., Teeter R.G., 1989. Effects of sodium and potassium salts on gain, water consumption, and body temperature of 4 to 7 week-old heat stressed broilers. *Nutr. Rep. Intern.*, 40, 161-169.
- Smith J.D., Burke W.H., Speers G.M., 1973. The response of starting turkeys to moderate differences in dietary potassium concentration. *Poultry Sci.*, 52, 1344-1348

Summary

The viscosity of poultry feeds : utilization for predicting the water consumption and excretion in 5 week-old meat-turkey poult.

A method for measurement of viscosity of aqueous extracts from raw materials and poultry feeds is described. Two viscosity determinations are carried out : for the first one, a treatment in boiling 80% ethanol is applied prior to aqueous extraction in order to deactivate endogenous enzyme activities. For the second one, no previous ethanol treatment is applied, which enables the expression of endogenous enzyme activities. These determinations are called «potential viscosity» and «real viscosity», respectively. Data are expressed as the Logarithm of relative viscosity, divided by the concentration of the original material in extract. This expression is called «applied viscosity». The repeatability of applied viscosities is about 5%. The potential applied viscosity (PAV) is additive. PAV measured on 26 types of raw material vary widely (1 : 100, minimum : maximum). The lowest PAV values are observed for sorghum, tapioca roots, peas and maize, and the highest for barley and rye. For cereals, PAV can be properly estimated using an extraction at pH 1.5 without prior ethanolic treatment.

Outlet temperature of pelleting (2.5 mm diameter) affects the values of real applied viscosity (RAV), high RAV values being observed only if PAV is high and if temperature is above 90°C. Particle size of extracted flours greatly changes the RAV values, coarse grinding resulting in low RAV values. It is demonstrated that the particle size effect is not due to an enzyme activity.

Excretion and consumption of water relative to feed intake are measured in 5 week-old meat-turkey poults using 27 diets. Regression lines are calculated with the bird data (means per diet) as the dependant variables, and the diet parameters as the independant variables. The most efficient equations are based on RAV and potassium, or on PAV, outlet temperature of pelleting and potassium. The highest R² values reach 0.758. According to the expressions of equations, the effects of dependant variables are not additive

CARRÉ B., GOMEZ J., MELCION J.P., GIBOULOT B., 1994. La viscosité des aliments destinés à l'aviculture. Utilisation pour prédire la consommation et l'excrétion d'eau. INRA Prod. Anim., 7 (5), 369-379.