

La disponibilité du phosphore pour l'écosystème du rumen

D. BRAVO (1,2), F. MESCHY (2), C. BOGAERT (1), D. SAUVANT (2)

(1) U.N.C.A.A. DNSA U.C.A.A.B. Chierry B P -19 02400 CHATEAU-THIERRY

(2) Laboratoire I N R A de Nutrition et d'Alimentation 16 rue Claude Bernard 75231 PARIS cedex 05

RESUME - L'article décrit la détermination, par la méthode des sachets nylon, de la disponibilité ruminale du phosphore d'un fourrage (luzerne déshydratée), de céréales (blé, blé tanné, orge, maïs), de sous-produits de céréales (son et drêches de blé, drêches de maïs) et de tourteaux (soja et soja tanné, colza et colza tanné, tournesol et tournesol tanné).

La disponibilité ruminale du phosphore est très variable de 33,1 % (tourteau de colza tanné) à 84,7 % (blé). La cinétique de solubilisation du phosphore de la luzerne indique une importante contamination par le phosphore bactérien. Les traitements technologiques influencent la teneur en phosphore : l'extraction du germe enrichit (son et drêches de blé) ou appauvrit (drêche de maïs) les sous-produits en phosphore par rapport à la céréale. Le tannage au formol diminuant la disponibilité ruminale du phosphore (de 77,2 % vs 89,4 %, blé à 33,1 % vs 64,4 %, tourteau de colza) semble pénaliser la valeur nutritionnelle du phosphore des tourteaux tannés.

Couplée aux cinétiques d'ingestion et de salivation, cette détermination permet d'évaluer l'apport total de phosphore aux microbes dans un souci d'optimisation de la digestion ruminale de la ration.

Phosphorus availability for rumen ecosystem

D. BRAVO (1,2), F. MESCHY (2), C. BOGAERT (1), D. SAUVANT (2)

(1) U.N.C.A.A. DNSA U.C.A.A.B. Chierry B P -19 02400 CHATEAU-THIERRY

(2) Laboratoire I N R A de Nutrition et d'Alimentation 16 rue Claude Bernard 75231 PARIS cedex 05

SUMMARY - The present communication presents the determination rumen phosphorus availability of some feedstuffs assessed with the nylon bag technique: a forage (alfalfa), cereals (control-C wheat, formaldehyde treated-FT wheat, barley, corn), cereal by-products (wheat bran, wheat distillers, corn distillers) and meals (C and FT soya bean meals, rapeseed meals and sunflower meals).

Rumen phosphorus availability was not uniform amongst the feedstuffs, varying from 33.1% (FT rapeseed meal) to 84.7% (C wheat). Alfalfa phosphorus release kinetics showed high bacterial phosphorus contamination. Technological treatments affected phosphorus content of by-products by either increasing (wheat bran and distillers) or decreasing (corn distillers) after germ extraction from the seed. Formaldehyde treatment decreasing rumen phosphorus availability (from 77.2% vs 89.4% for wheat to 33.1% vs 64.4% for the rapeseed meal) may depreciate the phosphorus nutritional value of FT meals.

INTRODUCTION

Les nouvelles contraintes de l'agriculture requièrent l'adaptation de l'alimentation animale notamment concernant les rejets émis par les élevages. Le phosphore est un élément polluant intervenant dans l'eutrophisation des lacs et des eaux superficielles. Jusqu'à 60 % des rejets en phosphore des productions animales sont issus des élevages de ruminants (Tamminga, 1992). Leur diminution passe par une meilleure connaissance du métabolisme du phosphore et en particulier, de l'absorption du phosphore alimentaire. Les premières quantifications proposées (Guéguen, 1962) s'avèrent à ce jour sous estimées (Valk et al, 2000). Une détermination plus précise constituerait une amélioration importante des systèmes actuels de recommandations.

Le phosphore disponible est le phosphore alimentaire solubilisé sous forme inorganique dans le tube digestif et en premier lieu dans le rumen. Les besoins en phosphore des microbes du rumen sont loin d'être négligeables (Komizarczuk, 1985). Le phosphore disponible pour l'écosystème du rumen constituerait un facteur d'importance nutritionnelle de la qualité du phosphore alimentaire (Witt et Owens, 1983).

Cette disponibilité a été rarement étudiée (fourrages : Flachowsky et Grün, 1992 ; les phosphates : Vitti et al, 1988). Dans cette communication, nous développons la détermination de la disponibilité pour les microbes du rumen du phosphore des matières premières à partir de la méthode des sachets nylon et nous en discutons la signification physiologique.

MATERIEL ET METHODES

1.1. LA MÉTHODE

La méthode des sachets nylon (Michalet-Doreau et al, 1987) est appliquée sur trois vaches Holstein munies de canules du rumen.

Certaines matières premières ont été tannées par application de 1 % d'une solution à 30 % de formaldéhyde (F) et comparées à un échantillon témoin (T) prélevé avant tannage. Les cinétiques de disparition dans le rumen sont mesurées sur un fourrage (luzerne déshydratée), des céréales (orge, maïs, blé F et T), des sous-produits (son de blé, drèches de blé et de maïs) et des tourteaux F et T (soja, colza, tournesol).

Sur les résidus d'incubation, le phosphore est déterminé par la méthode vanado-molybdate (AFNOR, NF V18-106).

1.2 LES CALCULS

La dégradabilité de la matière sèche (DMS_G) et la solubilisation du phosphore (SP_G) sont calculées par la méthode pas à pas (Michalet-Doreau et al, 1987) en supposant un taux de dilution du rumen de 6%/h. Les cinétiques de dégradation de la matière sèche (DMS) et de solubilisation du phosphore (SP) sont ajustées par le modèle d'Orskov et Mac Donald (1979) : $Y = A + B(1 - e^{-ct})$. Il distingue deux fractions A et B : pour la matière sèche (MS), dégradable rapidement (A_{MS}) et lentement (B_{MS}), et pour le phosphore (P), soluble (A_P) et solubilisable (B_P). Le modèle comporte également un taux constant de dégradation ou de solubilisation de la fraction lente, C_{MS} pour la MS et C_P pour le phosphore.

1.3 LE TRAITEMENT STATISTIQUE

L'analyse statistique est réalisée sous le logiciel SAS (SAS Institute, 1991).

Les fractions sont obtenues après ajustement par une procédure non linéaire.

L'analyse de la variance (par le modèle linéaire généralisé) conduit à deux modèles (1 et 2) :

$Y_{ij} = \mu + F_i + \varepsilon_{ij}$ avec ε l'erreur résiduelle et μ , la moyenne de Y ,

- Où Y est DMS_G ou SP_G (modèle 1), A ou B ou C pour la matière sèche et le phosphore (modèle 2),

- Où F est l'effet des 13 matières premières (modèle 1), des 8 couples de matière premières F et T (modèle 2).

Le test de Bonferroni distingue des moyennes différentes ($p < 0,05$) ou tendant à être différentes ($p < 0,1$).

2. RESULTATS

Tableau 1
Teneur en phosphore (P, en g/kg de MS), DMS_G et SP_G (moyenne, écart-type) pour les aliments concentrés.

	P	DMS_G (%) ¹	SP_G (%) ¹
Blé T	3,2	90,0 (0,1) ^a	89,4 (0,2) ^a
Blé F	3,2	80,3 (1,2) ^b	77,2 (1,4) ^d
Tx colza T	10,2	60,4 (2,3) ^{de}	64,4 (2,0) ^f
Tx colza F	10,2	38,7 (1,3) ^h	33,1 (1,3) ^h
Tx Soja T	6,3	79,2 (1,1) ^b	85,3 (0,9) ^{bc}
Tx Soja F	6,3	56,2 (0,9) ^{ef}	71,8 (1,1) ^e
Tx Tournesol T	10,1	55,3 (0,4) ^f	70,1 (0,5) ^e
Tx Tournesol F	10,1	45,8 (1,0) ^g	45,6 (0,7) ^g
Drèches blé	8,2	79,2 (1,1) ^b	85,1 (0,7) ^c
Son blé	8,8	70,5 (0,9) ^c	84,7 (0,5) ^c
Orge	3,4	87,7 (0,8) ^a	85,7 (1,3) ^{bc}
Maïs	3,0	62,2 (0,6) ^d	88,8 (0,4) ^{ab}
Drèches maïs	0,8	53,5 (1,2) ^f	66,4 (1,0) ^f

¹ Dans une même colonne, des exposants différents indiquent des moyennes différentes ($p < 0,05$).

2.1. DÉGRADATION DE LA MATIÈRE SÈCHE (TABLEAUX 1 ET 2)

La matière sèche des céréales est fortement et rapidement dégradée (90,1 % $\pm$ 0,1 pour le blé) sauf pour le maïs (62,2 % $\pm$ 0,6 $p < 0,05$). La matière sèche des sous-produits est dégradée plus faiblement que celle du grain pour le maïs et plus fortement pour le blé. La matière sèche des drèches de blé est plus dégradée ($p < 0,05$) que celle du son. La matière sèche du tourteau de colza est moins dégradée ($p < 0,05$) que celle du tourteau de soja. Les matières sèches de la luzerne (52,7 % $\pm$ 2,7) et du tourteau de colza tanné (38,7 % $\pm$ 1,3) sont les moins dégradées.

Le tannage diminue la fraction rapide de la matière sèche (A_{MS}) pour le blé et le tourteau de soja ($p < 0,05$) mais ne l'affecte pas pour les tourteaux de colza et de tournesol ($p > 0,1$). Inversement, il augmente la fraction lentement dégradable (B_{MS}) pour le blé ($p < 0,05$) et tend à l'augmenter pour le tourteau de soja et le tourteau de tournesol ($p < 0,1$), sans la modifier pour le tourteau de colza ($p > 0,1$). Enfin, la vitesse C_{MS} augmente après tannage pour le blé ($p < 0,05$) alors qu'elle diminue ($p < 0,05$) pour le tourteau de colza et reste constante pour les tourteaux de soja et de tournesol ($p > 0,1$).

Tableau 2
Paramètres des cinétiques DMS pour les matières premières T et F (moyenne, écart type)

	A_{MS}	B_{MS}	C_{MS}
Blé T	74,2 (1,9) ^a	21,5 (1,4) ^c	0,186 (0,031) ^b
Blé F	11,0 (0,6) ^d	77,2 (0,87) ^a	0,495 (0,044) ^a
Tx c colza T	13,05 (3,7) ^d	67,1 (2,6) ^{ab}	0,138 (0,048) ^{bc}
Tx colza F	16,8 (0,2) ^d	72,0 (3,9) ^{ab}	0,022 (0,004) ^d
Tx soja T	48,9 (2,2) ^b	57,0 (7,7) ^{bc}	0,078 (0,029) ^{dc}
Tx soja F	29,6 (0,6) ^c	68,3 (11,0) ^{ab}	0,025 (0,008) ^d
Tx tournesol T	33,8 (3,2) ^c	34,7 (2,2) ^{de}	0,090 (0,038) ^{dc}
Tx tournesol F	27,8 (2,3) ^c	50,4 (4,8) ^{dc}	0,032 (0,005) ^d

Dans une même colonne, des exposants différents indiquent des moyennes différentes ($p < 0,05$).

2.2. LA SOLUBILISATION DE PHOSPHORE (TABLEAU 1)

La cinétique de solubilisation du phosphore de la luzerne est successivement croissante et décroissante, alors qu'elle est constamment croissante pour les autres matières premières (Figure 1).

Le phosphore est fortement solubilisé pour les céréales (blé : 89,4 % $\pm$ 0,2 ; maïs : 88,8 % $\pm$ 0,4 ; orge : 85,7 % $\pm$ 1,3) et les sous-produits du blé (85,1 % $\pm$ 0,7 pour les drèches et 84,7 % $\pm$ 0,5 pour le son). Par contre, il est moins solubilisé pour les drèches de maïs (66,4 % $\pm$ 1,0 $p < 0,05$). Le phosphore le moins solubilisé ($p < 0,05$) est celui du tourteau de colza tanné (33,17 % $\pm$ 1,3) et du tourteau de tournesol tanné (45,6 % $\pm$ 0,7).

Tableau 3
Paramètres des cinétiques SP pour les matières premières T et F
(moyenne, écart type)

	A _P	B _P	C _P
Blé T	61,4 (1,4) ^a	38,9 (1,3) ^c	0,165(0,010) ^a
Blé F	53,6 (2,2) ^a	46,2 (2,7) ^c	0,064(0,002) ^b
Tx colza T	3,4 (2,8) ^d	97,0 (1,7) ^a	0,102(0,020) ^{ab}
Tx colza F	8,0 (2,5) ^{cd}	94,2 (2,1) ^a	0,020(0,001) ^b
Tx soja T	61,3 (1,8) ^a	47,1 (6,9) ^c	0,073(0,031) ^b
Tx soja F	37,9 (7,3) ^b	63,6 (7,3) ^b	0,103(0,072) ^{ab}
Tx tournesol T	30,3 (0,8) ^b	67,2 (0,7) ^b	0,086(0,005) ^{ab}
Tx tournesol F	13,8 (0,0) ^c	90,2 (1,1) ^a	0,032(0,002) ^b

Dans une même colonne, des exposants différents indiquent des moyennes différentes ($p < 0,05$).

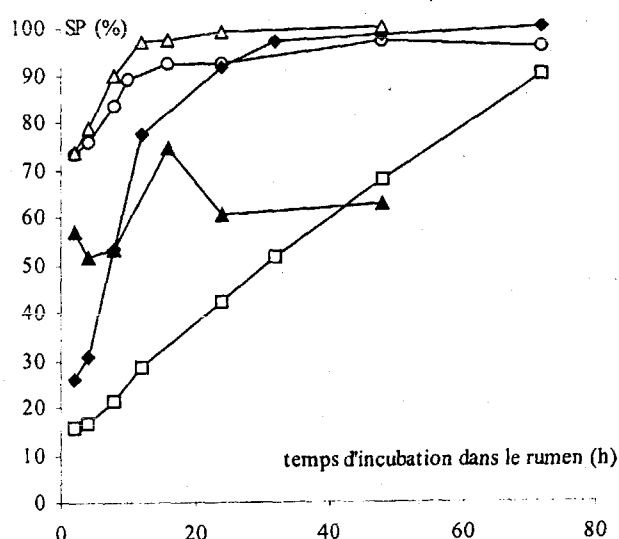
Le tannage diminue la solubilité du phosphore (A_P) du tourteau de soja et de tournesol ($p < 0,05$). Inversement, il augmente la part de phosphore solubilisable (B_P) de ces deux matières premières ($p < 0,05$). Le tannage n'affecte ni A_P, ni B_P du tourteau de colza et du blé ($p > 0,1$). La vitesse de solubilisation du phosphore (C_P) ne varie pas pour les tourteaux de tournesol et de soja ($p > 0,1$), tend à augmenter pour le tourteau de colza ($p < 0,1$) et diminue pour le blé ($p < 0,05$).

3. DISCUSSION

3.1. LA CONTAMINATION BACTÉRIENNE

La détermination de phosphore sur le résidu d'incubation est la différence entre le phosphore solubilisé de la matière première et le phosphore microbien entrant dans le sachet. L'importance relative de ces flux détermine un enrichissement ou un appauvrissement en phosphore du résidu conduisant à une sur ou sous estimation de la solubilisation du phosphore. Cette contamination bactérienne, pouvant représenter jusqu'à 61 % de l'azote résiduel après 12 h d'incubation (Michalet-Doreau et Ould Bah, 1989), a été observée sur le phosphore mais non quantifiée (Flachowsky et Grün, 1992). Comme pour l'azote, la contamination en phosphore devient quantitativement importante lorsque la matière première (fourrages) est pauvre en phosphore et lorsque les bactéries sont riches en phosphore (Komisarczuk, 1985). Ceci explique la cinétique croissante (solubilisation majoritaire) et décroissante (contamination majoritaire) pour la luzerne. Les sachets nylon ne permettent pas de mesurer la solubilisation du phosphore des fourrages dans le rumen.

Figure 1
Cinétiques SP. Luzerne déshydratée (▲), blé T (△), son de blé (○), tourteau de colza T (●), tourteau de colza F (◻)



3.2. PHOSPHORE, RUMEN ET TRAITEMENTS TECHNOLOGIQUES

Le phosphore est solubilisé rapidement pour les drèches de blé et lentement pour les drèches de maïs. Pourtant, ces sous-pro-

duits correspondent tous deux à la partie périphérique du grain après extraction du germe. Dans le blé, le phosphore est concentré dans les enveloppes périphériques sous forme phytique (Pointillart, 1994). Le retrait du germe conduit à un sous-produit riche en phosphore phytique rapidement hydrolysé par les phytases ruminales. A l'inverse, l'extraction du germe du grain de maïs retire également le phosphore puisque celui-ci y est concentré (Pointillart, 1994). Le résidu (drèche de maïs) contient peu de phosphore structurellement lié aux parois périphériques du grain. Il requiert une dégradation de la matière sèche préalable et est lentement solubilisé.

Le tannage au formol diminue la dégradation dans le rumen des protéines (Zelter et al, 1970) et de l'amidon (Michalet-Doreau et al, 1995). Nos résultats confirment que la solubilisation du phosphore dans le rumen est également perturbée, de par la diminution de la digestion du phosphore phytique (Park et al, 1999). Le phosphore phytique, lié aux protéines et à l'amidon (Gifford et Clydesdale, 1990), serait confiné et rendu indisponible pour la dégradation par les microbes du rumen après tannage. Dans ce cas, la solubilisation du phosphore requiert une dégradation préalable de la matière sèche. Ceci expliquerait pourquoi la matière sèche est dégradée plus vite que le phosphore n'est solubilisé dans les premières heures de la cinétique dans le cas du tourteau de tournesol tanné comparé au tourteau de tournesol témoin.

La dégradation dans le rumen du phosphore phytique est également perturbée par traitement thermique (Konishi et al, 1999). Les traitements technologiques communément utilisés dans l'alimentation du ruminant induisent donc de fortes différences de solubilisation du phosphore dans le rumen et conduisent à un flux de phosphore phytique "rumen by-pass". Une évaluation de la solubilisation post ruminale de ce phosphore serait toutefois nécessaire puisque cette solubilisation conditionne l'absorption potentielle du phosphore pour l'hôte et donc la précision des recommandations d'apports.

3.3. PHOSPHORE, RUMEN ET MICROBES

Le phosphore solubilisé dans le rumen est utilisé par les microbes. La carence en phosphore des microbes du rumen diminue la dégradation des parois végétales (Komisarczuk, 1985), diminuant l'utilisation du régime et la production de l'animal.

Le besoin en phosphore des microbes du rumen est plus élevé que celui de l'hôte (Preston et Pfander, 1964) et est estimé à 5 g de phosphore par kilogramme de matière organique digeste (Komisarczuk, 1985). Chez le ruminant, le phosphore est principalement apporté par la salive. L'apport quotidien de phosphore salivaire est calculé à partir de la teneur en phosphate de la salive (Bailey et Balch, 1961), du flux quotidien de salive (adapté de Symonds et Forbes, 1991) et de sa répartition dans la journée (Bailey, 1961).

Or, nos résultats montrent que selon les matières premières, la disponibilité du phosphore est très hétérogène. Ainsi, malgré sa forte teneur en phosphore (10,2g/kg de MS), le tourteau de colza tanné serait déprécié compte tenu de la faible solubilisation de son phosphore.

Les paramètres obtenus par les ajustements statistiques des cinétiques de phosphore sur les concentrés et les fourrages (Bravo, non publié) ont été couplés à la cinétique d'ingestion d'une vache laitière à l'auge (Dulphy et Faverdin, 1993) afin de déterminer la part de phosphore alimentaire effectivement mis à la disposition des microbes.

Le "phosphore soluble" est vidangé à taux constant avec la phase liquide, le "phosphore solubilisable", le "phosphore insoluble" et le "phosphore microbien" sont vidangés à taux constant plus lent.

L'adéquation de l'apport au besoin en phosphore des microbes peut être calculée par différence, à chaque instant à partir du début du repas, entre les apports de phosphore (salive + ration) et le prélèvement par les microbes.

Le phosphore apporté par la salive excède le phosphore alimentaire (Tomas, 1974). Toutefois, dans le cas de rations faiblement mastiquées (vaches laitières hautes productrices, Scott et Buchan, 1985), la comparaison des apports en phos-

phore au prélèvement par les microbes, indique des déficits de phosphore pouvant perturber les fermentations ruminales. Ceci est d'autant plus important chez la femelle laitière que le flux de phosphore dans le lait constitue un drain obligatoire du phosphore de l'organisme (Rodehutsord et al, 1994).

L'optimisation de la digestion du rumen et de l'apport en phosphore doit intégrer les besoins en phosphore des microbes (Lofgreen et Kleiber, 1953 ; Witt et Owens, 1983) en raisonnant sur la disponibilité du phosphore pour l'écosystème du rumen. Dans le cas d'une diminution de l'apport total en phosphore, préconisée par les chercheurs anglo-saxons (Valk et al, 1999 ; Wu et Satter, 2000), cette approche éviterait la carence en phosphore des microbes préjudiciable au maintien de la production (Valk, communication personnelle).

La disponibilité du phosphore pour les microbes du rumen a été déterminée par l'emploi de radio isotopes (Vitti et al, 1988). La solubilisation (SPG) mesurée dans notre essai n'est pas une mesure strictement exacte de la disponibilité du phosphore puisque du phosphore indisponible peut disparaître du sachet. Cette hypothèse est à nuancer puisqu'une fois le phosphore phytique extrait de la structure organique, la forte activité phytasique du rumen devrait rapidement l'hydrolyser en phosphate inorganique. C'est pourquoi, l'approche développée ici permet d'apprécier les différences de solubilisation entre les matières premières et pourrait constituer une voie intéressante de screening large des matières premières.

CONCLUSIONS

La solubilisation du phosphore dans le rumen est fortement différente entre matières premières comme par exemple entre céréales ou tourteaux et au sein même des tourteaux. Cette grandeur, déterminée par la méthode des sachets nylon (avec ou sans procédure de décontamination) est une voie d'appréciation et de précision de la qualité du phosphore alimentaire.

Aujourd'hui de nombreuses équipes travaillent à la diminution de l'apport alimentaire de phosphore afin de concilier les fortes productions animales et le respect de l'environnement. Compte tenu de l'importance du phosphore pour la production du ruminant d'une part et le respect de l'environnement d'autre part, ajuster les besoins en phosphore en précisant la disponibilité devient nécessaire. Nos résultats indiquent que la première étape de la disponibilité devrait être le rumen afin de prendre en compte le fort besoin en phosphore des microbes pour la dégradation des parois végétales et le maintien de la production.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'une bourse ANRT du Ministère Français de l'Education et de la Recherche.

Références bibliographiques disponibles auprès des auteurs.