

L'excrétion du phosphore chez le ruminant. Etude de la partition de la perte de phosphore entre l'urine et les fèces

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

(1) U.N.C.A.A. DPA U.C.A.A.B. Chierry BP-19, 02400 CHATEAU-THIERRY

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

RÉSUMÉ – Parce que les pertes en phosphore dans les élevages de ruminants constituent jusqu'à 70 % des rejets en phosphore des productions animales françaises, une meilleure connaissance de l'excrétion du phosphore chez le ruminant est nécessaire. Pour cela, une base de données de 150 articles publiés a été réalisée et étudiée sous l'angle quantitatif.

Les résultats montrent que la situation alimentaire classique d'un ruminant (ration fourragère) induit une excrétion du phosphore quasi uniquement fécale du fait du recyclage du phosphore salivaire et de la partie alimentaire non absorbée. Dans ce cas la production salivaire est l'acteur de l'homéostasie du phosphore. Si par contre comme c'est le cas lors du changement de régime au moment de la mise bas, l'animal reçoit une forte quantité de céréales l'excrétion du phosphore est totalement modifiée. De par leur faible masticabilité, les concentrés perturbent la production salivaire et la production de phosphore dans la salive puisque quel que soit le débit salivaire associé, la quantité de phosphore dans la salive est relativement constante. Pour pallier l'enrichissement consécutif du sang en phosphore, l'animal l'élimine dans l'urine dès la phosphorémie de 2mmol/l et réduit son absorption intestinale du phosphore. Au cours de ce changement de rations, l'excrétion du phosphore par l'animal est qualitativement modifiée puisque même si l'excrétion totale du phosphore n'est qu'en légère augmentation, le phosphore est alors rejeté pour moitié dans l'urine.

Cette perte de phosphore pourrait avoir des conséquences sur l'environnement. Le phosphore urinaire est peut-être beaucoup plus polluant que le phosphore fécal parce que plus labile plus miscible dans les eaux superficielles et sous forme directement intégrable dans les algues participant à l'eutrophisation.

Phosphorus excretion by the ruminant Study of the partition of phosphorus loss between urine and feces

D. BRAVO, F. MESCHY, C. BOGAERT, D. SAUVANT

U.N.C.A.A. DPA U.C.A.A.B. Chierry BP-19, 02400 CHATEAU-THIERRY

SUMMARY – Phosphorus losses from ruminant livestock represent up to 70 % of the french phosphorus losses from animal production. In order to understand better the determinism of the excretion of phosphorus by ruminants a data base involving 140 publications has been built and quantitatively reviewed.

The results show that the classical diets of ruminant (forages) involves a mostly fecal phosphorus excretion because of the recycling of salivary phosphorus. In this case, the salivary gland is the key of the phosphorus homeostasis. On the other hand, ruminant diet rich in concentrates (grains, meals...) induced a change of the way of excretion of phosphorus. Because, these raw materials are less chewed than forages, the concentrates disturb salivary production and phosphorus salivary production because whatever the salivary rate is, the salivary phosphorus concentration is relatively constant. The blood phosphorus increases and the animal removes the excess in the urine from the blood phosphorus over 2mmol/l. Moreover, the intestinal phosphorus absorption is reduced. The way of excretion of phosphorus by a ruminant fed with a high concentrate diet is mostly through urine rather than through feces.

The phosphorus loss in the urine could have consequences on the environment. The urinary phosphorus may be more labile, and may mix easier with the superficial water than the fecal phosphorus. Urinary phosphorus would be more pollutant than fecal phosphorus because of the consequence on algal development and eutrophication.

INTRODUCTION

Dans la prise en compte actuelle de l'environnement, les flux d'azote et de phosphore issus des productions animales sont considérés comme des sources polluantes majeures. Pour le phosphore, les élevages de ruminants sont à l'origine de 60 % aux Pays-Bas (Tamminga et Verstegen, 1992) et de 70 % en France (Guéguen, 1993) de ces flux. Un déséquilibre entre les apports en phosphore de la ration et la fraction utilisée par l'animal est à l'origine de ces rejets massifs c'est pourquoi une vache laitière de production moyenne rejette annuellement 75% du phosphore ingéré c'est à dire 20 kg par animal et par an, ce qui suggère, outre une modulation par l'alimentation (Tamminga, 1992), une meilleure connaissance du déterminisme de l'excrétion. L'excrétion du phosphore par le ruminant est essentiellement fécale, les pertes urinaires étant réduite mais la forme d'excrétion dépend beaucoup de la nature de la ration (Guéguen et Durand 1976). Extérioriser le potentiel des animaux revient pour les éleveurs à passer d'un régime riche en fourrages (entretien) à un régime riche en concentrés (production) au moment de la mise bas. Quel est l'impact de ce changement sur l'excrétion du phosphore ? C'est par une analyse quantitative que nous essaierons de répondre à cette question en étudiant le déterminisme de la partition du phosphore entre l'urine et les fèces chez le ruminant.

I. MATERIEL ET METHODES

I.1. LA BASE DE DONNÉES

Elle compile 150 articles publiés et se présente sous la forme d'un tableau dont les lignes (600) sont les observations expérimentales et les colonnes (80) sont les variables clés du problème.

I.2. LES VARIABLES DU PROBLÈME

Ce sont les flux de phosphore dans l'organisme de l'animal ruminant. L'excrétion fécale du ruminant est classiquement divisée en deux : endogène et exogène. Le phosphore endogène (P endogène) représente la quantité de phosphore radioactif retrouvé dans les fèces lorsque du phosphore radioactif est injecté dans le sang de l'animal, c'est la fraction de phosphore fécal d'origine sanguine c'est à dire salivaire (P salivaire) qui serait elle-même constituée de la perte obligatoire de phosphore et de la perte homéostatique (Spiekers et al., 1993). La base de données contient des informations de production endogène et de production salivaire exprimable sous la forme : P endogène = P salivaire - X où X représente la part de phosphore salivaire réabsorbé par l'animal. Une efficacité de la réabsorption salivaire c'est à dire le rapport entre le phosphore salivaire absorbé (P salivaire-P endogène) et le phosphore salivaire total peut être calculée. La fraction exogène du phosphore fécal (P exogène) représente la part de phosphore alimentaire rejeté par l'animal parce que ce phosphore n'est pas absorbé (déficience de la capacité d'absorption du phosphore de l'animal) ou parce qu'il n'est pas mis à la disposition de l'animal (déficience de l'absorbabilité du phosphore de la ration). Les parts des pertes endogène et exogène dans la perte fécale totale sont calculées. Outre le phosphore fécal, l'animal rejette le phosphore par l'urine (P urine). La part de l'excrétion fécale et urinaire par rapport à l'excrétion totale est également calculée.

Seul le contenu en cellulose brute des rations (moins de 2 % du contenu de la base de données) est interpolé à l'aide des tables de composition des aliments.

Même s'il existe peu de variabilité inhérente aux différences entre les méthodes d'étude expérimentale (les expériences sont souvent des bilans dont la plupart sont effectuées avec des radioisotopes), la base de données reste un dispositif non orthogonal, non équilibré qui requiert de nombreuses précautions de méthodologie et d'interprétations.

Les tableaux 1a et 1b présentent un résumé des variables de la base de données utiles pour la présente communication.

Tableau 1a et 1b
Matériel et méthodes : description de la base de données

Animaux	Ovins	497
	Bovins	92
	Caprins	49
Type de production	Croissance	160
	Entretien	285
	Gestation	8
	Lactation	111

Nom variable	N	Moyenne
Fourrage	580	42.9 ± 33.9
CB	353	147.6 ± 76.7
P salivaire	52	7.3 ± 2.2
P sang	319	2.1 ± 0.7
P absorbé	390	2.7 ± 2.7
P urinaire	435	0.6 ± 1.1
P fécal	505	4.7 ± 9.8
P endogène	390	1.6 ± 1.2
P ingéré	565	8.3 ± 18.5

1.3. LE TRAITEMENT STATISTIQUE

Les situations retracées dans cette étude sont monofactorielles : l'effet d'une variable explicative X est étudié statistiquement sur une variable à expliquer Y. En outre, par construction la base de données compile des résultats expérimentaux variés obtenus en des lieux différents par des équipes différentes ayant des objectifs de recherche parfois différents. Toute l'analyse statistique est effectuée en intra-expérience, c'est à dire que les variables sont ajustées de l'effet « expérience » à l'aide d'une analyse de la variance utilisant le modèle $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \epsilon'_{ijk}$ où μ est la moyenne de Y, α est l'effet de la covariable " expériences " sur Y et ϵ_{ik} représente l'erreur résiduelle du modèle c'est à dire, entre autre, la variable Y dépourvue de l'effet " expérience ", elle est alors appelée $Y_{ajust_{ijk}}$. Cette variable est ensuite étudiée à l'aide de régressions du type : $Y_{ajust_{ijk}} = \mu_{ajust} + a.X_i + \epsilon'_{ijk}$ avec μ_{ajust} la moyenne des variables ajustées, a le coefficient de la régression de X sur Y_{ajust} et ϵ' est l'erreur résiduelle non expliquée par le modèle.

2. RESULTATS

Les chiffres entre parenthèses renvoient aux numéros (première colonne) des équations du tableau 1.

2.1. EFFET DE LA COMPOSITION DE LA RATION

Les variations de flux de phosphore salivaire sont explicables à partir de celles du phosphore endogène (1), ces deux variables ne concordent pas ce qui permet de quantifier la part de phosphore salivaire réabsorbée par l'animal.

Les rations fourragères induisent l'augmentation de la perte endogène (2) ce qui sous-tend une augmentation de la production salivaire. Les équations reliant la perte urinaire (3) l'augmentation du recyclage salivaire (4) et la perte endogène (5) à la teneur en cellulose brute de la ration montrent l'importance de la présence de fibres mastiquées sur l'excrétion du phosphore. Lorsque la ration est fourragère et mastiquée, l'excrétion est surtout fécale.

Lorsque la teneur en céréales augmente dans la ration la perte endogène du phosphore diminue (6) parce que la production salivaire de phosphore (7) et donc le recyclage du phosphore par la salive sont perturbés et non parce que la production salivaire constante, le phosphore salivaire est mieux réabsorbé.

Tableau 2.

Résultats : modèle $Y = \alpha + \beta * X + \varepsilon$ Avec α et β données avec leurs écart-types, n est le nombre de lignes prises en compte, n' est le nombre d'expériences prises en compte dans le modèle R est le coefficient de corrélation du modèle, s est la variance de l'erreur résiduelle ε et p est la probabilité seuil d'acceptation du modèle. Le traitement statistique est réalisé en intra expérience.

N°	Y	X	α	β	n	R	S	P
1	P salivaire (g/j)	P endogène (g/j)	4,70 (0,59)	0,99(0,22)	38	0,90	1,90	0,001
2	P endogène (g/j)	Fourrages (%)	1,29 (0,10)	0,007 (0,001)	190	0,86	1,23	0,001
3	P urinaire (g/j)	CB (g/kg)	0,85 (0,10)	-0,002 (0,0006)	277	0,82	0,86	0,001
4	Psalivre réabsorbé(g/j)	CB (g/kg)	-1,90 (0,94)	0,04 (0,005)	37	0,85	1,22	0,001
5	P endogène (g/j)	CB (g/kg)	1,23 (0,13)	0,001 (0,0008)	263	0,84	1,00	0,001
6	Part endogène	Céréales (%)	0,69 (0,01)	-0,003 (0,0004)	190	0,89	0,16	0,001
7	Psalivre réabsorbé(g/j)	Céréales (%)	5,53 (0,58)	-0,03 (0,01)	38	0,82	1,80	0,1
8	Part exogène	Céréales (%)	0,31 (0,01)	0,003 (0,0004)	190	0,89	0,17	0,001
9	P absorbé (g/j)	Céréales ² (%)	2,49 (0,18)	0,01 (0,006)	190	0,90	1,17	0,001
10	Efficacité absorption	Céréales ² (%)	0,74 (0,008)	-2.10 ⁻³ (5.10 ⁻⁶)	190	0,80	0,14	0,001
11	P sanguin	Céréales (%)	1,91 (0,05)	0,01 (0,001)	261	0,78	0,70	0,001
12	P urinaire (g/j)	Céréales (%)	0,27 (0,06)	0,01 (0,001)	145	0,83	1,02	0,001
13	P urinaire (g/j)	P sang ² (mmol/l)	-0,47 (0,08)	0,27 (0,01)	251	0,87	0,75	0,001
14	Purinaire /Pendogène	P sang ² (mmol/l)	-0,63 (0,29)	-0,26 (0,04)	228	0,84	1,27	0,001
15	Part fécal	P sang ² (mmol/l)	1,04 (0,01)	-0,035 (0,002)	247	0,82	0,15	0,001
16	P rejeté / P ingéré	P sang ² (mmol/l)	1,03 (0,02)	-0,019 (0,005)	247	0,74	0,70	0,001
17	P endogène / P ingéré	P sang ² (mmol/l)	0,72 (0,02)	-0,040 (0,003)	259	0,81	0,21	0,001
18	P urinaire / P ingéré	P sang ² (mmol/l)	-0,02 (0,01)	0,03 (0,03)	252	0,79	0,14	0,1

En situation de concentré augmentant, la part de phosphore exogène dans les fèces augmente (8), même si l'absorption de phosphore augmente (9) parce que l'efficacité de l'absorption (P absorbé / P ingéré) diminue (10). L'enrichissement du sang en phosphore (11) est expliqué par le passage d'une ration fourragère à une ration concentrée, cet enrichissement est faible et contemporain d'une élimination du phosphore par l'urine (12).

2.2. LA PHOSPHORÉMIE

La perte urinaire est très nettement reliée à la phosphorémie (13) par une équation quadratique. A partir de la valeur seuil de 2 mmol de phosphore par litre de sang, le flux urinaire de phosphore quasi inexistant jusqu'alors se met en place très rapidement et évite l'enrichissement du sang en phosphore. C'est

donc pour une phosphorémie de 2mmol/l que la partition entre l'excrétion fécale et urinaire du phosphore débute (14, 15).

2.3. IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT ET PRÉDICTION DES REJETS

Rapporté à l'ingéré, les rejets en phosphore sont fortement dépendant de la phosphorémie. La proportion de phosphore rejeté par rapport au phosphore ingérée diminue (16), mais cette diminution s'accompagne de la partition entre le fécal endogène (17) et l'urinaire (18) d'une part et au sein même du fécal d'une substitution du phosphore endogène par le phosphore exogène. La connaissance du phosphore ingéré et de la teneur en phosphore du plasma donne pour 302 observations, une estimation relativement précise (R=0,98 ; s=0,87) des rejets en phosphore d'un ruminant. Une légère amélioration peut être effectuée si en plus est ajoutée la variable Cellu-

Tableau 3.
Estimation des rejets en phosphore par les ruminants.

N°	Equations d'estimations	nobs	R	s
1	P rejeté (g/j) = 1,52 (±0,19) -0,48 (±0,09)* P sang (mmol/l) +1,15 (±0,02)* P ingéré (g/j)	352	0,98	0,87
2	P rejeté (g/j) = 3,51 (±1,05) -0,44 (±0,10)* P sang (mmol/l) +1,16 (±0,02)* P ingéré (g/j) - 0,011 (±0,006)*CB (%)	397	0,98	0,75
3	P urinaire (g/j) = -0,86 (±0,15) +0,04 (±0,01)* P ingéré (g/j) + 0,59 (±0,07)*P sang (mmol/l)	329	0,86	0,71
4	P fécal (g/j) = 1,71 (±0,16) + 0,43 (±0,01)*P ingéré (g/j)	505	0,98	2,24

lose Brute. Le tableau 3 donne des prédictions simples des principaux flux polluants chez le ruminant.

3. DISCUSSION

Les glandes salivaires sont de fortes concentratrices du phosphore puisque le phosphore y est 10 fois plus concentré que dans le sang (Ternouth, 1991), tant que la salivation est maintenue à un niveau correct les pertes de phosphore sont essentiellement fécales (Ternouth, 1989).

Lors du passage d'une ration fourragère à une ration concentrée, la production de phosphore par la salive étant diminuée, le sang tend à s'enrichir en phosphore. L'homéostasie du phosphore est perturbée, c'est pourquoi l'animal développe des systèmes palliatifs. Le premier est la mise en place rapide de l'excrétion rénale dès la phosphorémie-seuil de 2mmol/l. Cet effet est observé au cours de diverses situations : naturellement pour les veaux pré-ruminant ne recevant qu'une alimentation liquide (Guéguen, 1963), lorsque les animaux reçoivent une ration riche en concentrés, au cours du passage d'une ration broyée à une ration finement moulue (Scott et Buchan, 1988),

ou lorsque les veines parotides irriguant les glandes salivaires sont ligaturées (Tomas et Somers, 1974). L'apport massif de concentrés induit le passage d'une homéostasie régie par la glande salivaire typique des ruminants (Guéguen et Durand, 1976) à une homéostasie régie par le rein typique des monogastriques tel que le chien, le rat ou le porc (Scott et Buchan, 1985). Cet effet est du à la nature physique des concentrés (Scott et Buchan, 1988) et non à l'acidogénicité de ces rations (Scott et Buchan, 1985).

Pour pallier l'enrichissement du sang en phosphore, une deuxième action de l'animal serait de limiter l'absorption intestinale du phosphore. La mauvaise absorption du phosphore des rations très concentrées peut-être due à la mauvaise absorption de l'animal ou à une mauvaise disponibilité du phosphore des aliments. Une étude en cours (Bravo et al, non publiée) montre que cette deuxième alternative est erronée, donc l'animal absorbe très mal le phosphore d'une ration concentrée peut-être pour ajuster son homéostasie et limiter les entrées massives de phosphore dans le sang.

Pour l'environnement, le passage d'une ration fourragère à une ration concentrée s'accompagne de modifications quantitatives et qualitatives des rejets. Le ruminant excrète beaucoup de phosphore mais ce phosphore est pour moitié perdu dans l'urine. Le phosphore de l'urine n'est il pas plus polluant que le phosphore fécal parce que plus labile et plus directement intégrable dans les algues responsables de l'eutrophisation ?

CONCLUSION

Alimenter un ruminant avec une ration concentrée peut induire des perturbations métaboliques de type acidose cette synthèse a permis de mettre en évidence que l'homéostasie du phosphore est également fortement perturbée. D'exclusivement fécale, l'excrétion du phosphore devient urinaire à l'instar des monogastriques. L'augmentation des rejets est une conséquence logique de la modification d'alimentation. Les concentrés (céréales, tourteaux) sont en général très riches en phosphore. Un animal recevant plus de phosphore en excrétera plus (loi d'action de masse), mais c'est dans la modification qualitative de l'excrétion qu'il faut voir un risque puisque un animal dans ces conditions alimentaires excrétera la moitié du phosphore par l'urine alors que dans la situation standard cette

excrétion est négligeable. A terme, cette situation peut perturber l'environnement. Pourtant, un tel désordre et de tels rejets ne doivent ils pas être tolérés puisque ils sont la conséquence des fortes productions et de l'alimentation associée ? La recherche d'un compromis entre les fortes production, le respect du bien-être de l'animal (mastication perturbée) et de l'environnement (flux de phosphore et d'azote) semble cependant devenir indispensable.

- Guéguen, L. 1963.** Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys., 3, 243-253
Guéguen, L., Durand M. 1976. Ann. Zootech., 25, 543-549
Guéguen, L., 1993 Proceedings of the VITOLMIN, Angers, A.F.C.A. Paris
Scott, D., Buchan, W. 1988 Q. j. exp. Physiol., 73, 315-322
Scott, D , Buchan, W. 1985 Q. j. exp. Physiol., 70, 365-375
Spijkers, H., Brinrup, R., Balmelli, M., Pfeffer, E. 1993. J. Anim. Physiol. A. Anim. Nutr., 69, 37-43
Tamminga, S. 1992, J. Dairy Sci. 75, 345-357
Tamminga, S., Verstegen, M. W. A. 1992. Rec. Adv. Anim. Nutr., 113-130
Ternouth, J. H. 1989. J. Agric. Sci., 113, 291-297
Ternouth, J. H. 1991. Rec. Adv. Anim. Nutr. 143-151
Tomas, F. M., Somers, M. 1974. Aust. J. Agric. Res. 475-483