

D. BRAVO^{1,2}, F. MESCHY²

¹ INZO, BP n°19, Chierry,
02402 Château-Thierry cedex
dbravo@inzo-net.com

² INRA INA-PG, UMR Physiologie de la
Nutrition et Alimentation, 16, rue
Claude Bernard, 75231 Paris cedex 05
meschy@jouy.inra.fr

Vers une révision des recommanda- tions d'apports en phosphore chez le ruminant

Des rejets excessifs de phosphore dans les effluents d'élevage contribuent à l'eutrophisation des eaux de surface. En France, environ 70 % du phosphore annuellement rejeté par les productions animales sont attribuables aux élevages de ruminants. Même si une part non négligeable est recyclée dans les productions fourragères, il convient de réévaluer les apports alimentaires recommandés, afin de les ajuster au plus près aux besoins des animaux.

Aujourd'hui, l'agriculture doit composer avec de nouvelles contraintes de protection de l'environnement. La concentration des élevages dans des bassins de production augmente la pression de pollution des nutriments résiduels dans les déjections. Parmi eux, le phosphore est responsable de l'eutrophisation des eaux superficielles et des phénomènes de marées vertes. Les animaux d'éle-

Résumé

Pour répondre aux impératifs environnementaux émergents, il est devenu nécessaire de considérer les recommandations d'apport en phosphore à la fois sous l'angle d'une connaissance plus fine des besoins des animaux et de la maîtrise des rejets polluants. Les paramètres les plus sensibles de l'approche factorielle, besoin d'entretien et efficacité de l'utilisation digestive du phosphore ou coefficient d'absorption réelle (CAR), ont été réexamинés par l'analyse quantitative d'une base de données bibliographiques et par de nouvelles données expérimentales. Le besoin d'entretien apparaît fortement dépendant du flux salivaire de phosphore et de ses facteurs de variation ; il est donc logique de l'estimer à partir de la matière sèche ingérée et non du poids vif des animaux. La prise en compte de l'excrétion fécale du phosphore d'origine microbienne devrait contribuer à l'avenir à mieux préciser le besoin d'entretien. Les CAR retenus jusqu'à présent pour le calcul des recommandations sont notamment inférieurs aux données expérimentales publiées ; des différences substantielles sont observées entre les CAR des différents aliments et certains facteurs d'explication ont pu être mis en évidence. Les systèmes futurs devront adopter des valeurs de CAR différentes selon les aliments ou au moins selon les familles d'aliments. La vitesse de libération du phosphore dans le rumen est très variable selon les matières premières, ce qui suggère des différences importantes de disponibilité du phosphore pour l'écosystème du rumen. Dans la perspective d'une réduction sensible de l'apport de phosphore aux ruminants, il deviendra nécessaire de vérifier l'impact de cette disponibilité sur l'efficacité des microorganismes du rumen.

vage rejettent annuellement environ 300 000 tonnes de phosphore dans l'environnement et les élevages de ruminants contribuent pour 70 % à ce rejet (Guéguen 1993). Apporte-t-on trop de phosphore aux ruminants ? Cela revient à s'interroger sur l'apport quotidien recommandé par les organismes nationaux dont l'INRA en France. Les marges de sécurité intégrées dans les systèmes actuels méritent d'être reconSIDérées afin de mieux ajuster l'apport de phosphore au besoin de l'animal (Meschy et Guéguen 1998, Valk *et al* 2000).

L'étude des lois générales du métabolisme du phosphore par le traitement quantitatif d'une base de données bibliographique et de résultats expérimentaux récents (Bravo 2001), permet aujourd'hui d'apporter un éclairage nouveau sur le besoin d'entretien en phosphore et la disponibilité pour l'animal du phosphore alimentaire.

1 / Description succincte de la base de données

Une centaine d'articles originaux publiés avant mai 1999 répondant aux mots-clés phosphore, ruminants, digestibilité et métabolisme ont été retenus pour construire la base de données qui recense 2982 animaux répartis parmi les trois espèces de ruminants domestiques : ovins (58 %), bovins (35 %) et caprins (7 %).

Le besoin d'entretien en P est la quantité à apporter pour couvrir la perte de P d'origine endogène, celle-ci variant avec la ration ingérée.

Chaque ligne représente un traitement expérimental. Les colonnes indiquent les références, les essais, les informations qualitatives et quantitatives sur les animaux, les régimes et les mesures dont l'ingestion de matière sèche (MSI, en g/jour) et la teneur en phosphore de la ration (RATION_P, g/kg MS). Les teneurs en phosphore phytique (PHYT_P, g/kg MS) et en cellulose brute (CB, g/kg MS) absentes des articles originaux ont été estimées à partir de tables de composition alimentaire (INRA 1988, Pointillart 1994). Le métabolisme du phosphore a été décrit en utilisant les flux de phosphore exprimés en g/jour : phosphore ingéré (ING_P), salivaire (SAL_P), fécal total (FEC_P) et fécal endogène (ENDO_P). Ces flux de base mesurés dans les articles ont permis d'estimer le flux de phosphore total arrivant dans le tube digestif (TOT_P = ING_P + SAL_P), le flux de phosphore fécal d'origine alimentaire (EXO_P = FEC_P - ENDO_P), les flux de phosphore absorbé d'origine alimentaire (ABS_{ING} = ING_P - EXO_P) ou salivaire (ABS_{SAL} = SAL_P - 0,8 ENDO_P) en considérant que le phosphore fécal endogène est constitué à 80 % de phosphore salivaire non réabsorbé (Horst 1986). Les flux de phosphore ont également été rapportés à la MS ingérée (exprimés en g/kg de MS) ainsi qu'au poids vif des animaux (exprimés en g/kg de PV). Toutes les abréviations utilisées dans cet article, leurs unités ainsi que les formules de calcul sont rassemblées dans le tableau 1.

De nombreuses relations ont été obtenues sur une plage d'apports usuels de phosphore c'est-à-dire réduits aux bornes 2,5 et 5,0 g/kg de MS. Des précautions méthodologiques ont été nécessaires pour analyser cette base de données qui est un plan statistique incomplet et déséquilibré de variables non orthogonales. La cohérence de chaque variable a été testée sur les moyennes, les valeurs extrêmes, les écarts types et la normalité. Toutes les relations étudiées (globales, intra ou inter essais) sont monofactorielles ; les variables ont été pondérées par le nombre d'animaux employés par traitement. Les modèles présentés dans cet article sont décrits par le nombre de traitements (TRT), le nombre de publications (EXP) et le nombre

d'animaux (ANIM) pris en compte, le coefficient de détermination (R^2), l'écart type résiduel (ETR) et le niveau de signification du test t du modèle (P). Enfin, les coefficients des modèles sont suivis entre parenthèses de leur écart type.

2 / Besoin d'entretien en phosphore

2.1 / Facteurs de variation du phosphore fécal endogène

Le besoin d'entretien est la quantité de phosphore à apporter pour couvrir la perte quotidienne obligatoire de phosphore. Le ruminant perd essentiellement le phosphore par voie fécale car son excréption par l'urine est souvent négligeable (Spiekers *et al* 1993), bien qu'elle puisse devenir importante lorsque la quantité distribuée d'aliments concentrés est élevée (Scott 1972). La perte fécale de phosphore est composée de phosphore non absorbé, à la fois d'origine alimentaire et endogène. Le besoin d'entretien est la part incompressible du phosphore fécal endogène. Ainsi, mieux connaître les facteurs de variation de la perte fécale endogène de phosphore permettra de préciser la prédition du besoin d'entretien en phosphore.

Dans la base de données, la liaison statistique entre le phosphore fécal endogène et le poids vif est faible. En revanche, elle est particulièrement forte entre le phosphore fécal endogène (ENDO_P) et la MS ingérée (MSI) puisque pour les régimes ni fortement carencés, ni très excessifs, c'est-à-dire apportant entre 2,5 g et 5,0 g de phosphore par kg de MS, la relation intra-essai suivante est observée :

$$\text{ENDO}_P / \text{PV} = 1,41 \cdot 10^{-3} (\pm 0,04 \cdot 10^{-3}) \text{ MSI} / \text{PV} \quad (\text{TRT} = 341, \text{EXP} = 55, \text{ANIM} = 1252, \text{ETR} = 8,5 \cdot 10^{-3}, R^2 = 0,94 ; \text{figure 1})$$

Le flux de phosphore ingéré (ING_P) intervient significativement, mais moins fortement que l'ingestion de MS d'après les relations globales ci-dessous selon que les flux sont rapportés au poids vif ou à la MS ingérée :

Tableau 1. Abréviations, unités et définitions des variables de la base de données utilisées dans le texte.

Abréviation(unité)	Définition (formule)
%FOUR (%)	Teneur de la ration en fourrages
ABS _{ING} (g/jour)	Flux d'absorption du phosphore alimentaire (= ING _P - EXO _P)
ABS _{SAL} (g/jour)	Flux d'absorption du phosphore salivaire (SAL _P - 0,8 x ENDO _P)
CB (g/kg MS)	Teneur de la ration en cellulose brute
ENDO _P (g/jour)	Flux quotidien de phosphore faecal endogène
EXO _P (g/jour)	Flux quotidien de phosphore faecal exogène (= FEC _P - ENDO _P)
FEC _P (g/jour)	Flux quotidien de phosphore faecal total
ING _P (g/jour)	Flux quotidien de phosphore ingéré (= MSI x RATION _P)
MS (%)	Matière sèche
MSI (g/jour)	Matière sèche ingérée
PHYT _P (g/kg MS)	Teneur de la ration en phosphore phytique
PV (g)	Poids vif
RATION _P (g/kg MS)	Teneur de la ration en phosphore total
SAL _P (g/jour)	Flux quotidien de phosphore salivaire
TOT _P (g/jour)	Flux quotidien total de phosphore entrant dans le tube digestif (= ING _P + SAL _P)

$$\text{ENDO}_P / \text{PV} = 1,17 \cdot 10^2 (\pm 0,86 \cdot 10^2) \\ \pm 0,25 (\pm 0,01) \text{ING}_P / \text{PV} \\ (\text{TRT} = 377, \text{EXP} = 56, \text{ANIM} = 1317, \text{ETR} = 2,19 \cdot 10^2, R^2 = 0,68; P < 0,01)$$

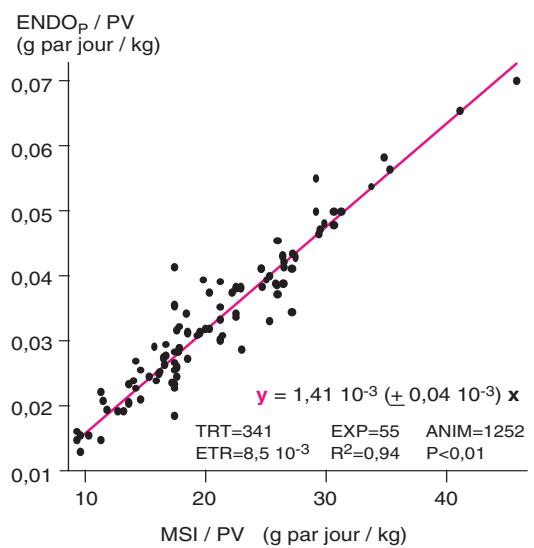
$$\text{ENDO}_P / \text{MSI} = 0,70 (\pm 0,04) \\ + 0,20 (\pm 0,01) \text{ING}_P / \text{MSI} \\ (\text{TRT} = 356, \text{EXP} = 53, \text{ANIM} = 1287, \text{ETR} = 0,97, R^2 = 0,51; P < 0,01)$$

L'estimation du besoin d'entretien par rapport au poids vif de l'animal (INRA 1978, NRC 1989) est progressivement abandonnée au profit d'une estimation par rapport à la matière sèche ingérée (AFRC 1991, NRC 2001) puisque, pour un même poids vif, les pertes fécales endogènes sont très variables. Des animaux de même poids ingérant des quantités différentes de MS présentent, selon cette approche, des besoins d'entretien en phosphore différents, ce qui améliore la précision de la prédiction. Ainsi, pour une vache de 700 kg produisant 35 l de lait, le besoin d'entretien de 21 g calculé par Guéguen *et al* (1987) serait de 22 g ou de 25 g selon qu'elle ingère 22 kg de matière sèche d'ensilage d'herbe ou 25 kg de bon foin de graminées (sous l'hypothèse d'un besoin d'entretien de 1 g de phosphore par kg de MS ingérée selon Kirchgessner 1993).

Une voie supplémentaire de précision de la prédiction du besoin d'entretien en phosphore peut-elle être obtenue par la prise en compte de teneurs nutritionnelles ? En effet, le flux de phosphore fécal endogène est essentiellement déterminé par le flux de salive qui varie avec certains composants alimentaires.

Dans notre base de données, la teneur en fourrages du régime (%FOUR) est un facteur de variation de la perte fécale endogène de phosphore (ENDO_P), comme indiqué par le

Figure 1. Évolution du flux de phosphore fécal endogène rapporté au poids vif ($\text{ENDO}_P / \text{PV}$) en fonction de l'ingestion de matière sèche rapportée au poids vif (MSI / PV).



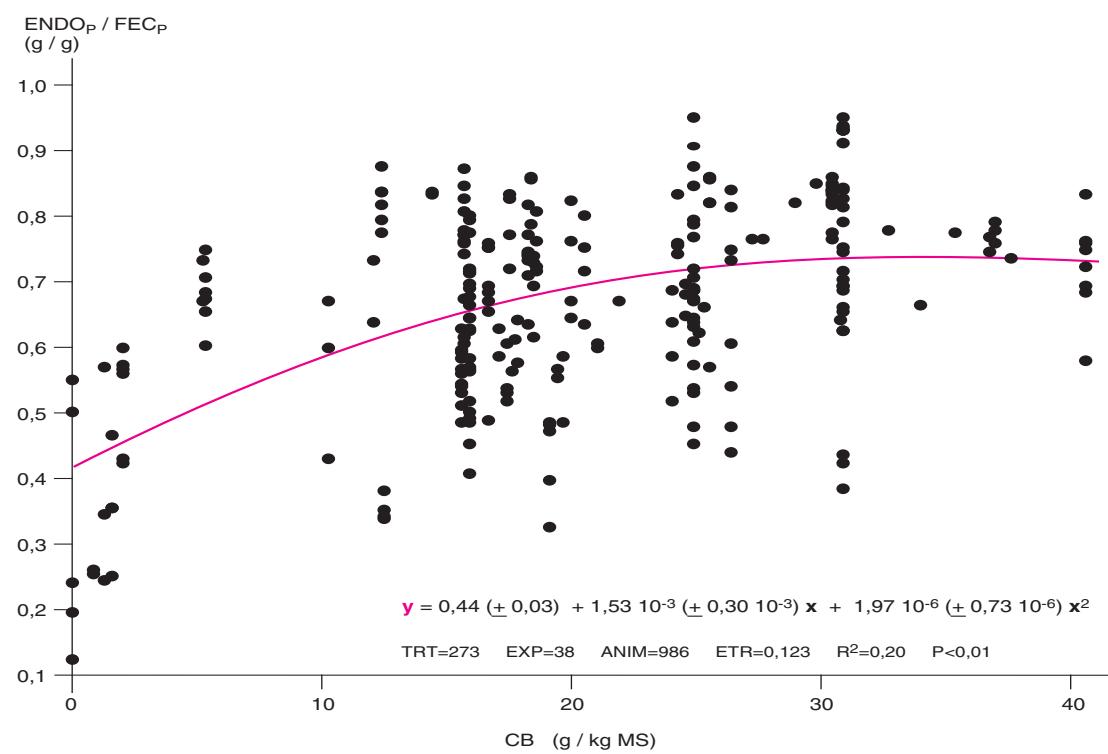
modèle inter-essai suivant :

$$\text{ENDO}_P = 1,1 (\pm 0,10) + 1,65 \cdot 10^2 (\pm 0,18 \cdot 10^2) \%FOUR \\ (\text{TRT} = 342, \text{EXP} = 59, \text{ANIM} = 1190, \text{ETR} = 2,43, R^2 = 0,20; P < 0,01)$$

Curieusement, la teneur alimentaire en cellulose brute (CB) n'explique que 5 % des variations de la perte fécale endogène de phosphore (ENDO_P), mais 20 % des variations de la part de phosphore fécal endogène dans la perte fécale totale ($\text{ENDO}_P / \text{FEC}_P$), comme le soulignent les deux modèles globaux suivants :

$$\text{ENDO}_P = 0,95 (\pm 0,25) + 4,66 \cdot 10^3 (\pm 1,13 \cdot 10^3) \text{CB} \\ (\text{TRT} = 276, \text{EXP} = 39, \text{ANIM} = 995, \text{ETR} =$$

Figure 2. Évolution de la part de phosphore fécal endogène (ENDO_P) dans le phosphore fécal total (FEC_P) selon la teneur en cellulose brute du régime (CB).



2,71, $R^2 = 0,05$; $P < 0,01$)

ENDO_P / FEC_P = 0,44 (± 0,03) + 1,53.10⁻³
 $(\pm 0,30.10^{-3})$ CB + 1,97.10⁻⁶ (± 0,73.10⁻⁶) CB²
 $(TRT = 273, EXP = 38, ANIM = 986, ETR = 0,123, R^2 = 0,20 ; P < 0,01 ; \text{figure 2})$

Par conséquent, préciser certains composants alimentaires améliorerait encore la prédition du besoin d'entretien en phosphore. Un tel système, très modulable, gagnerait en précision et permettrait d'ajuster au mieux l'apport de phosphore au besoin réel de l'animal. Ainsi, dès 1991, l'AFRC attribuait un besoin d'entretien en phosphore supérieur lorsque les rations sont riches en fourrages par rapport à des rations riches en concentrés.

2.2 / L'écosystème du rumen, composant du besoin d'entretien ?

Pour les rations apportant entre 2,5 et 5,0 g de phosphore par kg de MS, l'absorption du phosphore salivaire (ABS_{SAL}) augmente linéairement avec le flux de phosphore salivaire (SAL_P) comme l'indique le modèle global sui-

vant :
 $ABS_{SAL} / MSI = 0,77 (\pm 0,01) SAL_p / MSI$
 $(TRT = 16, EXP = 5, ANIM = 16, ETR = 2,01,$
 $R^2 = 0,90 ; P < 0,01 ; \text{figure 3})$

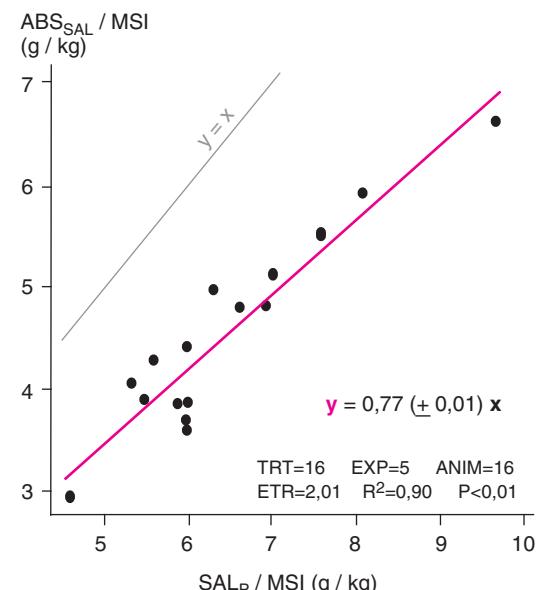
*L'absorption du P
augmente avec la
quantité de P
ingérée, mais à
ingestion constante,
une part élevée de P
sous forme phytique
la diminue.*

Ainsi, dans les situations usuelles d'alimentation, le ruminant absorbe en moyenne 77 % du phosphore salivaire. Pourtant, ce phosphore, sécrété sous forme d'ion phosphate, est très disponible et devrait être plus efficacement absorbé. Les microorganismes du rumen utilisent le phosphore salivaire et l'intègrent dans des molécules organiques, principalement sous forme de nucléotides (Komisarczuk 1985, Pfeffer 1995). L'ingestion des bactéries par les protozoaires contribuerait également à retarder l'utilisation du phosphore salivaire et expliquerait pourquoi sur des moutons, le flux duodénal de phosphore est supérieur après défaunation (Boila et Phillips 1988). A l'instar de l'azote microbien, une partie de ce phosphore n'est pas utilisable par l'animal (Rodehutscord *et al* 2000). Dès lors, 20 % du phosphore microbien (Wu et Satter 2000) est rejeté et constitue une perte quotidienne de phosphore, inévitable mais variable. Le phosphore fécal endogène (ENDO_o) se décompose alors en :

- une perte obligatoire : le besoin d'entretenir en phosphore *stricto sensu*, principalement constitué du phosphore salivaire non réabsorbé ;
 - une perte variable selon les régimes, mais obligatoire pour un régime donné : le phosphore microbien ;
 - une perte variable et non obligatoire égale à la différence entre la perte fécale endogène et les pertes obligatoires précédentes et qui est une composante de l'homéostase du phosphore chez le ruminant.

Le besoin d'entretien au sens large utilisé dans le calcul de l'apport recommandé quotidien correspond aux deux pertes obligatoires, la perte microbienne pouvant être prédictée à partir de la teneur en matière organique fermentescible (MOF) et de ses composants.

Figure 3. Évolution de l'absorption de phosphore salivaire rapportée à l'ingestion de matière sèche (ABS_{SAL} / MSI) en fonction du phosphore salivaire rapporté à l'ingestion de matière sèche (SAL_P / MSI).



Dans ce contexte, une ration induisant une croissance microbienne importante augmenterait le prélèvement de phosphore par les microbes du rumen, la perte fécale de phosphore microbien et donc le besoin d'entretien (Rodehutscord *et al* 2000). Ces résultats suggèrent encore que certains composants alimentaires amélioreraient la prédition du besoin d'entretien en phosphore. Malheureusement, les données actuelles sont insuffisantes pour permettre une analyse quantitative et une intégration dans un système de recommandations et cette hypothèse nécessite des validations expérimentales.

3 / Disponibilité digestive du phosphore alimentaire

3.1 / Disponibilité du phosphore alimentaire pour l'animal

La méthode factorielle est très sensible à la valeur retenue de disponibilité du phosphore (ou coefficient d'absorption réelle, CAR). Pour un même besoin net de 40 g, augmenter le CAR de 50 % (NRC 1989) à 70 % (Kirchgessner 1993) permet une économie de 23 g de phosphore par jour et par animal. L'AFRC (1991) propose un CAR supérieur pour les rations riches en aliments concentrés (70 %) par rapport aux rations riches en fourrages (58 %) alors que le NRC (2001) envisage des valeurs de CAR différentes pour les fourrages (64 %), pour les aliments concentrés (70 %) et pour les phosphates (variable, mais supérieure à 75 %).

Avec les rations de la base de données contenant entre 2,5 et 5,0 g/kg de MS, l'absorption du phosphore alimentaire (ABS_{ING}) augmente linéairement avec l'ingestion de phosphore (ING_P), selon le modèle intra-

essais suivant :

$ABS_{ING} / MSI = 0,72 (\pm 0,01) ING_P / MSI$
(TRT = 113, EXP = 29, ANIM = 418, ETR = 0,84, $R^2 = 0,97$; $P < 0,01$; figure 4)

Il indique qu'un ruminant absorbe en moyenne 72 % du phosphore d'origine alimentaire. Les valeurs américaine (50 % : NRC 1989) et française pour les vaches en seconde partie de lactation (55 % : INRA 1988) sont largement plus basses. Pourtant, le coefficient de détermination du modèle global correspondant à l'équation ci-dessus est de 79 % ; la variabilité résiduelle n'est pas expliquée par la quantité de phosphore ingérée et pourrait l'être par les différences de disponibilité du phosphore des matières premières (Field *et al* 1984). Ainsi, de fortes teneurs en phosphore phytique traduites par un ratio phosphore phytique sur phosphore total ($PHYT_P / RATION_P$) élevé, diminuent l'absorption du phosphore pour des ingestions de phosphore constantes comme l'indique le modèle global suivant, dans lequel Y est le résidu de la régression du phosphore ingéré (ING_P) sur l'absorption du phosphore d'origine alimentaire (ABS_{ING}) :

$Y = -0,374 (\pm 0,07) + 0,11 (\pm 0,02) (PHYT_P / RATION_P)^{-1}$
(TRT = 66, EXP = 19, ANIM = 581, ETR = 0,87, $R^2 = 0,28$; $P < 0,01$; figure 5)

Pourtant, en dépit de son importance dans le calcul de l'apport recommandé en phosphore, peu de travaux ont mesuré chez le ruminant la disponibilité du phosphore des aliments. Alors que les phosphates inorganiques ont été assez largement étudiés (Underwood et Suttle 1999), les résultats sont plus rares sur les fourrages et surtout les aliments concentrés. La disponibilité digestive du phosphore des fourrages est élevée : 70,8 %

Figure 4. Évolution de l'absorption de phosphore alimentaire rapportée à l'ingestion de matière sèche (ABS_{ING} / MSI) en fonction de l'ingestion de phosphore rapportée à l'ingestion de matière sèche (ING_P / MSI).

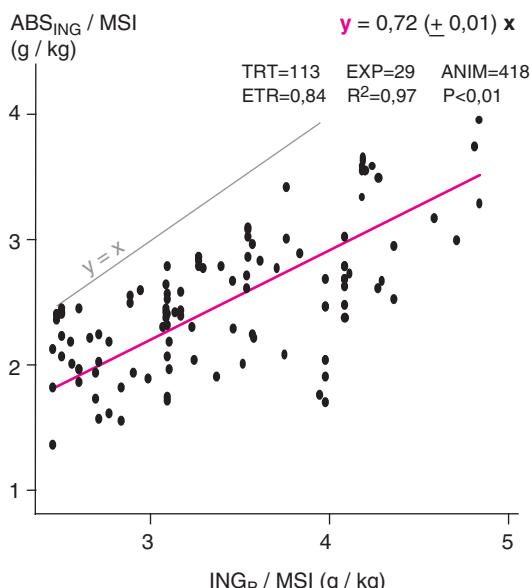
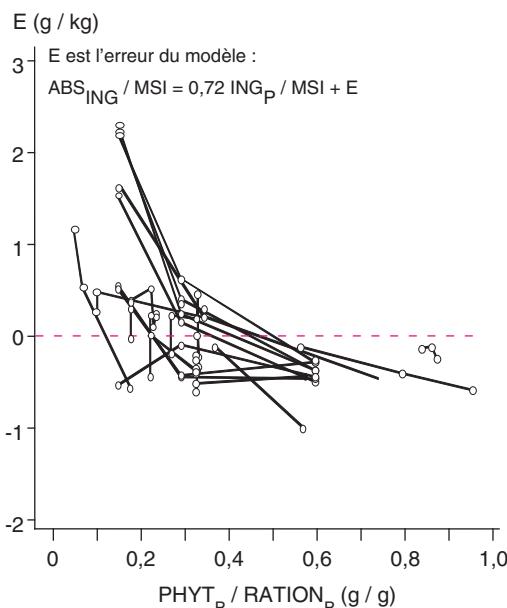


Figure 5. Évolution de l'absorption du phosphore ingéré (ABS_{ING} / MSI) à phosphore ingéré constant (ING_P / MSI) selon la part de phosphore phytique ($PHYT_P$) dans le phosphore total du régime ($RATION_P$). Les points reliés par un trait correspondent aux différents traitements d'une même publication.



(Guéguen et Durand 1976), 75,1 % (Dayrell et Ivan 1989) sur moutons à l'entretien et même 80,0 % sur des vaches laitières (Martz *et al* 1990). Plus de 70 % du phosphore des céréales, 70,5 % du phosphore du corn gluten meal (Field *et al* 1984) et 90 % du phosphore du son de blé (Koddebusch et Pfeffer 1988) sont absorbés. La principale limite des systèmes de recommandation actuels relève du choix de la valeur absolue du CAR provenant de l'adoption d'une marge de sécurité importante et de son caractère constant faute d'informations suffisantes à l'époque.

Adopter un système dans lequel la disponibilité du phosphore est différente entre fourrages et concentrés mais constante au sein même de ces groupes (AFRC 1991, NRC 2001) peut être également sujet à critiques dans la mesure où certaines matières premières comme les tourteaux sont très différentes en termes botaniques et technologiques. Nous avons mesuré la digestibilité apparente du phosphore pour différents tourteaux (de soja, de tournesol et de colza, en l'état ou tannés au formol, Bravo *et al* 2003). Différents modèles de prédiction de la perte fécale endogène du phosphore (AFRC 1991, NRC 2001, Bravo 2001) ont permis de calculer des digestibilités réelles. Ces résultats ont montré qu'au sein même du groupe des tourteaux, de fortes différences existaient sur la digestibilité du phosphore apparente et réelle calculée. Par exemple, en appliquant notre modèle, 67,9 % du phosphore du tourteau de soja sont absorbés contre seulement 60,5 % du phosphore du tourteau de colza. Il apparaît qu'appliquer une valeur constante de disponibilité du phosphore pour tous les aliments concentrés est insuffisante, surtout dans un contexte de formulation où de nombreux tourteaux contribuent à l'apport de phosphore (colza, tournesol...).

Pour mieux ajuster les apports aux besoins, il faut prendre en compte de façon beaucoup plus précise l'absorption réelle du P, très variable selon les constituants de la ration.

3.2 / La disponibilité digestive du phosphore alimentaire pour l'écosystème du rumen

Le phosphore entrant dans le rumen provient de la salive (SAL_P) et de la ration (ING_P), mais l'un et l'autre se substituent, ainsi que l'indique le modèle suivant établi pour des rations comportant entre 2,5 et 5,0 g de phosphore par kg de MS :

$$SAL_P / MSI = 9,34 (\pm 1,18) - 0,84 (\pm 0,14) ING_P / MSI$$

$$(TRT = 18, EXP = 5, ANIM = 74, ETR = 2,19, R^2 = 0,23 ; P = 0,02 ; \text{figure 6})$$

Plus la ration est riche en phosphore, plus le flux de phosphore salivaire, rapporté à la MS ingérée, est faible, ce qui se rencontre dans le cas des rations concentrées, riches en phosphore et stimulant moins la salivation d'ingestion et de rumination. Pour des rations riches en fourrages, les ions phosphates de la salive sont le principal pourvoyeur de phosphore inorganique dans le rumen (Tomas *et al* 1967). Ils satisfont le besoin en phosphore de l'écosystème du rumen estimé par Komisarczuk (1985), Guéguen *et al* (1987) et Jouany *et al* (1995) à 5,0 g de phosphore inorganique soluble par kg de MOD de la ration. Pour des rations riches en aliments concentrés, la disponibilité du phosphore alimentaire permet-elle de compenser le moindre apport de phosphore salivaire ?

L'utilisation du phosphore d'une matière première par les microorganismes du rumen a été mesurée selon différentes méthodes *in vitro* (Anderson *et al* 1956), *in vivo* (Vitti *et al* 1988) ou *in situ* (Playne *et al* 1978, Flachowsky et Grün 1992, Park *et al* 1999). Cette dernière est intéressante car rapide et d'accès facile. Elle permet le bilan entre le flux de phosphore sortant du sachet (phosphore libéré par la matière première) et le flux de phosphore entrant dans le sachet (contamination bactérienne). Or, du phosphore peut sortir du sachet sous forme phytique soluble, forme indisponible pour l'écosystème qui doit être rapidement hydrolysée en phosphore inorganique pour devenir disponible.

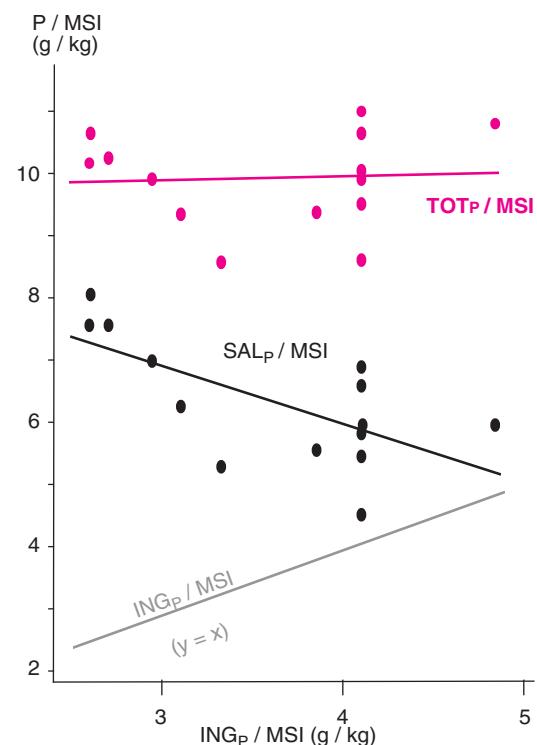
Nous avons mené plusieurs essais afin de préciser la solubilisation du phosphore des matières premières concentrées dans le rumen, sujet très peu renseigné dans la bibliographie. Au vu des résultats, la solubilisation du phosphore est très hétérogène selon les matières premières (figure 7). D'après les cinétiques de solubilisation du phosphore dans le rumen ajustées selon le modèle d'Ørskov et Mac Donald (1979), il s'avère qu'après 8 heures *in situ*, les particules de céréales ont toutes libéré au moins 80 % de leur phosphore (Bravo *et al* 2000). En revanche, la solubilisation du phosphore des tourteaux dans le rumen est beaucoup plus variable que celle des céréales : la solubilité instantanée du phosphore, qui correspond au premier coefficient du modèle d'Ørskov, varie entre 3,4 % pour le tourteau de colza tanné et 62 % pour le tourteau de soja.

Utiliser la méthode des sachets nylon pour déterminer la solubilité de phosphore d'une matière première dans le rumen permet donc

d'approcher la disponibilité du phosphore de cette matière première pour l'écosystème du rumen, avec les biais associés à cette méthode que nous avons discutés (Bravo *et al* 2000 et 2002).

Le besoin en phosphore de l'écosystème du rumen, l'apport en phosphore et les facteurs influençant la croissance bactérienne peuvent être pris en compte par la modélisation mécaniste (Bravo 2001). Lorsque le bilan est global sur une journée, les rations des ruminants sont aujourd'hui toutes excédentaires en phosphore pour l'écosystème du rumen. En effet, compte tenu du fort apport de phosphore par la salive qui peut représenter jusqu'à 70 % de l'apport total (Tomas *et al* 1967), le phosphore salivaire couvre, à l'échelle de la journée, le besoin en phosphore de l'écosystème du rumen. Mais lorsque le bilan est analysé en cinétique, il semble que cet écosystème subisse un déficit en phosphore juste après l'ingestion et avant le début de la rumination. Le déficit en phosphore constaté au cours des premières heures précède l'activité des bactéries cellulolytiques qui débute 6 heures après le repas (Van Gylswyk et Labuschagne 1971). Néanmoins, les populations microbiennes du rumen semblent capables de survivre à une carence sévère en phosphore par la mise en place de processus adaptatifs de stockage – déstockage de phosphore en cas d'excès ou de carence (Komisarczuk 1985) et elles constituerait, à l'instar des protozoaires pour l'amidon (Sauvant et Van Milgen 1995), un compartiment délai pour le phosphore dans le rumen.

Figure 6. Évolution des flux de phosphore ingéré (ING_P / MSI), salivaire (SAL_P / MSI) et total ($TOT_P = ING_P + SAL_P$) en fonction du flux de phosphore ingéré.



$$SAL_P = 9,34 (\pm 1,18) - 0,84 (\pm 0,14) x$$

$$TRT=18 \quad EXP=5 \quad ANIM=74$$

$$ETR=2,19 \quad R^2=0,23 \quad P=0,02$$

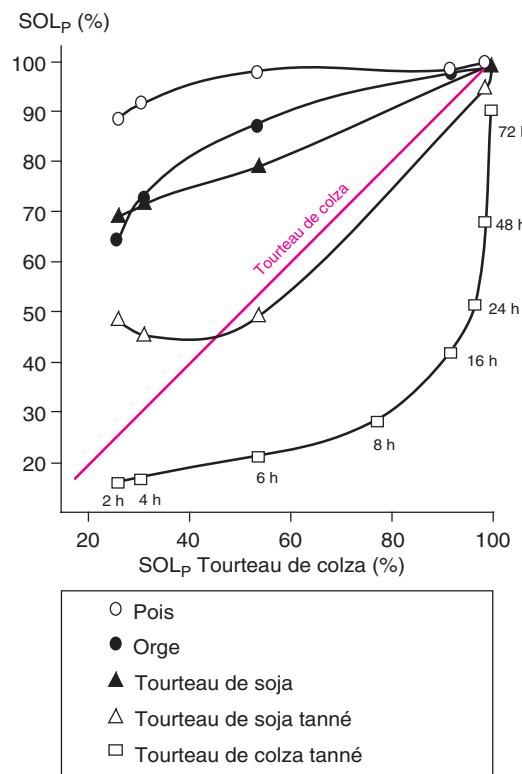
Toutefois, les rations actuelles intègrent des proportions élevées d'aliments concentrés qui, d'une part, augmentent la vitesse de vidange donc diminuent la probabilité de solubilisation dans le rumen du phosphore d'une particule et, d'autre part, diminuent le flux salivaire de phosphore par la réduction du flux quotidien de salive (Tomas 1974, Yano *et al* 1978). En outre, ces rations sont distribuées à des vaches hautes productrices qui exportent vers le lait un flux obligatoire et conséquent de phosphore à partir du phosphore plasmatique. Si ce flux n'est pas compensé par un apport alimentaire adéquat, cela pourrait contribuer à un épaissement en phosphore de la vache laitière, et donc à une diminution du flux de phosphore dans la salive par baisse de la concentration salivaire de phosphore. Dans ce cas, le phosphore alimentaire constituerait la source de phosphore soluble ou rapidement solubilisé pour l'écosystème du rumen (Tomas *et al* 1967). Néanmoins, à ce jour, aucun travail expérimental publié n'a été conduit dans ce sens.

Conclusion

La nécessité de diminuer les rejets en phosphore des élevages appelle un ajustement de l'apport de phosphore aux ruminants c'est-à-dire un reparamétrage de la méthode factorielle.

La comparaison des valeurs d'absorption réelle du phosphore adoptées par les systèmes de recommandations actuels aux données de la littérature montre un écart notable. Cet écart correspond à une importante marge de sécurité (variations entre animaux, de composition de ration...) pouvant être sensiblement réduite sans risque pour les performances et la santé des animaux. Dans un système élaboré de recommandation d'apport en phosphore aux ruminants, l'écosystème du rumen s'avère une composante du besoin

Figure 7. Cinétiques de solubilisation du phosphore dans le rumen (SOL_P) de diverses matières premières comparées à celle du tourteau de colza.



d'entretien et de la disponibilité digestive du phosphore que de nouveaux travaux devraient permettre de quantifier. Il reste également à préciser la relation entre le besoin d'entretien en phosphore et la fermentescibilité des rations et à compléter les informations sur la réponse de l'écosystème rumen à la disponibilité du phosphore alimentaire.

Références

La liste des références ayant servi à l'élaboration de la base de données est disponible auprès des auteurs et consultable dans la référence Bravo (2001).

AFRC (Agricultural and Food Research Council), 1991. Technical committee on responses to nutrients. Report 6. A reappraisal of the calcium and phosphorus requirements of sheep and cattle. Nutr. Abstr. Rev., 61, 573-612.

Anderson R., Cheng R., Burroughs W., 1956. A laboratory technique for measuring phosphorus availability of feed supplements fed to ruminants. J. Anim. Sci., 15, 489-495.

Boila R.J., Phillips G.D., 1988. Effects of faunation, protein source and surgical modification of the intestinal tract upon flows of calcium, phosphorus and magnesium in the digestive tract of sheep. Can. J. Anim. Sci., 68, 853-863.

Bravo D., 2001. Contrôle nutritionnel des flux de phosphore chez le ruminant. Thèse de l'INA-PG, Paris, 151 p.

Bravo D., Meschy F., Bogaert C., Sauvant S., 2000. Rumen phosphorus availability from several feedstuffs measured by the nylon bag technique. Reprod. Nutr. Dev., 40, 149-162.

Bravo D., Meschy F., Bogaert C., Sauvant S., 2002. Effects of fungal phytase addition, formaldehyde treatment and dietary concentrate content on ruminal phosphorus availability. Anim. Feed Sci. Technol., 99, 73-95.

Bravo D., Meschy F., Bogaert C., Sauvant S., 2003. Phosphorus availability of oilseed meals determined by the apparent faecal digestibility technique. Anim. Feed Sci. Technol. (in press).

Dayrell M.S., Ivan M., 1989. True absorption of phosphorus in sheep fed corn silage and corn silage supplemented with dicalcium or rock phosphate. Can. J. Anim. Sci., 69, 181-186.

Field A.C., Wooliams J.A., Dingwall R.A., Munro C.S., 1984. Animal and dietary variation in the absorption and metabolism of phosphorus by sheep. J. Agric. Sci., 103, 283-291.

Flachowsky G., Grün M., 1992. Influence of type of diet and incubation time on major elements release in saccus from Italian ryegrass, untreated and ammonia-treated wheat straw. Anim. Feed Sci. Technol., 36, 239-254.

Guéguen L., 1993. Bien nourrir les animaux en minéraux. II Pour préserver la santé de l'Homme et son environnement. Vitomin AFCA (ed), Angers.

Guéguen L., Durand M., Meschy F., 1987. Apports recommandés en éléments minéraux majeurs pour les ruminants. Ann. Zootech., 25, 543-549.

Guéguen L., Durand M., Meschy F., 1987. Apports recommandés en éléments minéraux majeurs pour les ruminants. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 105-112.

- Horst R.L., 1986. Regulation of calcium and phosphorus homeostasis in the dairy cow. *J. Dairy Sci.*, 69, 604-616.
- INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), 1978. Alimentation des ruminants. Jarrige R. (ed), Editions INRA, Paris.
- INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), 1988. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Jarrige R. (ed), Editions INRA, Paris.
- Jouany J.-P., Broduscou L., Prins R.A., Komisarczuk-Bony S., 1995. Métabolisme et nutrition de la population microbienne du rumen. In: Jarrige R., Ruckebusch Y., Demarquilly C., Farce M.-H., Journet M. (eds), Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion, 349-382. Editions INRA, Paris.
- Kirchgessner M., 1993. Mittelungen des Ausschusses für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie. *Proc. Soc. Nutr. Physiol.*, 1, 108-112.
- Koddebusch L., Pfeffer E., 1988. Untersuchungen zur Verwertbarkeit von Phosphor verschiedener Herkünfte an laktierenden Ziegen. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.*, 60, 269-275.
- Komisarczuk S., 1985. Etude de l'influence du phosphore sur l'activité fermentaire, la protéosynthèse et les teneurs en ATP de contenus de rumen dans différents systèmes de culture continu. Thèse de l'Université de Paris Sud Centre d'Orsay, 200 p.
- Martz F.A., Belo A.T., Weiss M.F., Belyea R.L., 1990. True absorption of calcium and phosphorus from alfalfa and corn silage when fed to lactating cows. *J. Dairy Sci.*, 73, 1288-1295.
- Meschy F., Guégén L., 1998. Les recommandations d'apport alimentaire en éléments minéraux : analyse et perspectives. *Renc. Rech. Ruminants*, 5, 237-240.
- NRC (National Research Council), 1989. Nutrient requirements of dairy cattle. Washington: National Academy Press.
- NRC (National Research Council), 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. Washington: National Academy Press.
- Ørskov E.R., Mac Donald I., 1979. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *J. Agric. Sci.*, 92, 499-503.
- Park W.-Y., Matsui T., Konishi C., Kim S.-W., Yano F., Yano H., 1999. Formaldehyde treatment suppresses ruminal degradation of phytate in soyabean meal and rapeseed meal. *Br. J. Nutr.*, 81, 467-471.
- Pfeffer E., 1995. Mineral and vitamin metabolism. In : Engelhardt W.V., Leonhard-Marek S., Breves G., Giesecke D. (eds), Ruminant physiology: Digestion, metabolism, growth and reproduction, 608-609. Enke, Stuttgart.
- Playne M.J., Echevarria M.G., Megarry R.G., 1978. Release of nitrogen, sulfur, phosphorus, calcium, magnesium, potassium and sodium from four tropical hays during their digestion in nylon bags in the rumen. *J. Sci. Food Agric.*, 29, 520-526.
- Pointillart A., 1994. Phytates, phytases : leur importance dans l'alimentation des monogastriques. *INRA Prod. Anim.*, 7, 29-39.
- Rodehutscord M., Heuvers H., Pfeffer E., 2000. Effect of organic matter digestibility on obligatory faecal phosphorus loss in lactating goats, determined from balance data. *Anim. Sci.*, 70, 561-568.
- Sauvant D., Van Milgen J., 1995. Les conséquences de la dynamique de la digestion des aliments sur le métabolisme ruminal et les performances animales. *INRA Prod. Anim.*, 8, 353-367.
- Scott D., 1972. Excretion of phosphorus and acid in the urine of sheep and calves fed either roughage or concentrate diets. *Q. J. Exp. Physiol.*, 57, 379-392.
- Spiekers H., Brintrup R., Balmelli M., Pfeffer E., 1993. Influence of dry matter intake on faecal phosphorus losses in dairy cows fed rations low in phosphorus. *J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr.*, 69, 37-43.
- Tomas F.M., 1974. Phosphorus homeostasis in sheep. II. Influence of diet on the pathway of excretion of phosphorus. *Aust. J. Agric. Res.*, 25, 484-493.
- Tomas F.M., Moir R.J., Somers M., 1967. Phosphorus turnover in sheep. *Aust. J. Agric. Res.*, 18, 635-645.
- Underwood E.J., Suttle N.F., 1999. The mineral nutrition of livestock. 3rd Edition. CABI Publishing, Oxon, New York.
- Valk H., Metcalf J.A., Withers P.J.A., 2000. Prospects for minimizing phosphorus excretion in ruminants by dietary manipulation. *J. Environ. Qual.*, 29, 28-36.
- Van Gylswyk N.O., Labuschagne J.P.L., 1971. Relative efficiency of pure cultures of different species of cellulolytic rumen bacteria in solubilizing cellulose in vitro. *J. Gen. Microbiol.*, 66, 109-113.
- Vitti D.M.S.S., Da Silva Filho J.C., Abdalla A.L., 1988. Phosphorus availability for rumen microorganisms: effect of different sources. *J. Nuclear Agric. Biol.*, 17, 186-187.
- Wu Z., Satter L.D., 2000. Milk production and reproductive performance of dairy cows fed two concentrations of phosphorus for two years. *J. Dairy Sci.*, 83, 1052-1063.
- Yano F., Kawashima R., Kojima Y., 1978. Effect of feeding with grains differently processed on macro mineral concentration of rumen fluid in sheep. *Jpn. J. Zootech. Sci.*, 49, 195-197.

Abstract

Towards revised dietary phosphorus recommendation for ruminants.

To take into account the environmental challenge, recommended phosphorus allowances have to satisfy refined animal requirement assessments as well as the control of pollutant loading in the environment. In the factorial approach, the most sensitive parameters which are maintenance requirement (MR) and true absorption coefficient (TAC), were re-considered through a quantitative treatment of a bibliographic database and some recent experimental results. MR is strongly related to phosphorus salivary flow and its variations; consequently, dry matter intake appeared to better estimate MR than body weight. In the future, the quantification of rumen micro-organisms in phosphorus faecal excretion may allow to assess MR more

accurately. Up to now, the TAC values currently used for the calculation of recommendations are way below the experimental data; important variations were also observed between feedstuffs. Future nutritional standards may adopt specific TAC values for feedstuffs or at least for feedstuff groups. Phosphorus release kinetics in the rumen were highly variable among feedstuffs, this suggests that there are differences in phosphorus availability for the rumen ecosystem. With the hypothesis of a significant decrease of phosphorus supply to ruminants, the effect of these discrepancies upon micro-organism efficiency must be investigated.

BRAVO D., MESCHY F., 2003. Vers une révision des recommandations d'apports en phosphore chez le ruminant. *INRA Prod. Anim.*, 16, 19-26.