

# Les recommandations d'apport alimentaire en éléments minéraux : analyse et perspectives

F. MESCHY (1), L. GUEGUEN (2)

(1) INRA Laboratoire de Nutrition et d'Alimentation INA PG, 16, rue Claude Bernard 75231 Paris cedex 05

(2) INRA Laboratoire de Nutrition et Sécurité Alimentaire, Domaine de Vilvert 78352 Jouy-en-Josas cedex

**RÉSUMÉ** – La méthode factorielle de détermination des besoins en éléments minéraux majeurs qui consiste à évaluer des besoins physiologiques nets et l'efficacité de l'absorption digestive de l'apport alimentaire (coefficient d'absorption réelle) est la base des systèmes de recommandation d'apport alimentaire actuels. Cette approche classique a été et sera encore très utile à la rationalisation de l'alimentation des ruminants. Toutefois les facteurs de variation des principaux paramètres de la méthode ne sont pas aujourd'hui pris en compte (une valeur unique est le plus souvent retenue). De plus, l'élevage doit répondre à de nouvelles préoccupations telles que la qualité des produits animaux ou la maîtrise des flux polluants. En d'autres termes, nous devons pouvoir prévoir les lois de réponse des animaux aux variations de l'apport alimentaire ; dans un premier temps, un meilleur paramétrage de l'efficacité de l'absorption et des rejets est nécessaire. En outre, une meilleure maîtrise de la charge de pollution des effluents d'élevage exige l'utilisation de sources minérales de haute valeur nutritionnelle (phosphates et oligo-éléments).

## Mineral requirements of ruminants analysis and possible improvements

F. MESCHY (1), L. GUEGUEN (2)

(1) INRA Laboratoire de Nutrition et d'Alimentation INA PG, 16, rue Claude Bernard 75231 Paris cedex 05

**SUMMARY** – The factorial method is actually the most efficient one for the assessment of macro mineral requirements of animals. It consists of establishing net physiological requirements (maintenance, growth, pregnancy and lactation) and true absorption coefficients (TAC).

This classical approach has been and remains very useful in ruminant nutrition but it cannot really take into account the variation of its parameters (for example there is generally only one value of TAC, or faecal endogenous losses). Moreover, cattle feeding must integrate other objectives such as quality of animal products or control of excreted elements in terms of pollution. In other words, we have to be able to predict the laws of responses of animals to the dietary variations ; as a first step, a better assessment of the main parameters of the factorial approach (maintenance requirement and TAC) taking into account its variation is needed. Moreover, mineral pollution control requires the utilisation of high bioavailability supplement sources (phosphates and trace elements).

## INTRODUCTION

Il y a plus de trente ans, les Britanniques proposaient le premier système cohérent et moderne de recommandations d'apport alimentaire en éléments minéraux pour les ruminants (ARC, 1965). Sur cette base, complétée par de nouveaux résultats expérimentaux, des systèmes de recommandations d'apport minéral sont apparus dans divers pays (NRC 1971, 1984 et 1988; INRA, 1978 et 1988; ARC 1980 et 1984; AFRC, 1991...). Succédant à quelques polémiques scientifiques (INRA vs ARC) un bon accord international s'est établi pour la plupart des éléments minéraux d'intérêt nutritionnel (Meschy et Guéguen, 1996). Les systèmes d'alimentation ont été élaborés pour répondre en priorité à des objectifs de production et ne sont pas nécessairement adaptés à d'autres préoccupations émergentes auxquelles l'élevage doit aujourd'hui faire face telles que la qualité des produits animaux ou la maîtrise des rejets polluants, ce dernier point concernant particulièrement le phosphore et certains oligo-éléments (zinc et surtout cuivre).

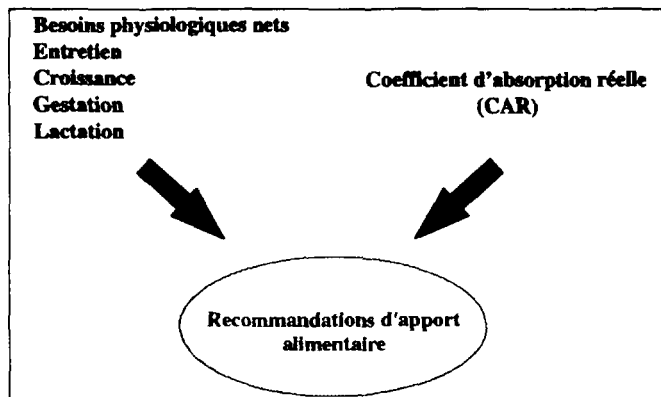
La démarche générale est commune à l'ensemble des systèmes : méthode factorielle pour les éléments majeurs, « dose-réponse » pour le soufre et les oligo-éléments; seules les valeurs de certains paramètres de la méthode factorielle (besoin net d'entretien et absorption réelle) ont évolué depuis 1965 et peuvent être différentes d'un système à l'autre mais tous ces systèmes présentent une cohérence interne et des limites communes. L'objectif de ce rapport n'est pas de comparer ces recommandations d'apport, mais d'analyser et d'envisager les perspectives d'évolution de l'évaluation des besoins des ruminants et de la prévision de la charge polluante des effluents d'élevage.

## 1. LES BESOINS EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX DES RUMINANTS

### 1.1. ÉLÉMENTS MINÉRAUX MAJEURS

Les besoins alimentaires des animaux en phosphore (P), calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K) et sodium (Na) sont évalués par une méthode factorielle (fig. 1).

Figure 1  
La méthode factorielle de détermination des besoins en éléments minéraux majeurs



Elle consiste à déterminer les besoins physiologiques nets (BPN) correspondant aux différentes catégories de dépense minérale de l'organisme (entretien, croissance, gestation et lactation) puis ensuite à évaluer l'efficacité de l'utilisation digestive de l'apport minéral alimentaire ou coefficient d'absorption réelle (CAR), seuls les minéraux absorbés étant en mesure de satisfaire les BPN.

#### 1.1.1. Les besoins physiologiques nets

**Le besoin net d'entretien** est généralement assimilé aux pertes endogènes fécale et urinaire (ces dernières sont faibles pour P et Ca dans des conditions alimentaires classiques chez le ruminant). **Pour le phosphore**, il convient toutefois de relativiser ce point de vue dans la mesure où il existe une relation quasi-linéaire entre le niveau d'ingestion de P et la perte fécale endogène (Grace, 1981; Braithwaite, 1985; Scott *et al*, 1987; Ter-

nouth, 1989; Scott *et al*, 1985; Bravo *et al*, 1998). Ceci indique une double origine de la perte endogène fécale de P : une part incompressible correspondant au véritable besoin d'entretien et une fraction beaucoup plus variable représentant une composante excrétoire permettant à l'organisme, dans certaines limites, l'excrétion du phosphore absorbé en excès et qui représente un flux polluant qu'il est possible de réduire. D'autres facteurs de variation de l'excrétion endogène, ou de la partition urine fèces (voir le rapport de Bravo *et al* dans ce même recueil) ont été identifiés tels que le rapport fourrage/concentré (F/C, Guéguen, 1963; Scott et Buchan, 1985) ou la granulométrie de la ration (Scott et Buchan 1988; Meschy et Peyraud, 1998). Chez le ruminant, la perte fécale endogène de P est très fortement liée à la production salivaire en raison du recyclage très efficace (la réabsorption du phosphore salivaire est de l'ordre de 80 %) de P par cette voie; ainsi, dans des conditions normales d'insalivation et de rumination le retour salivaire dans le rumen représente plus du double de la quantité de P ingérée (Scott et McLean, 1981). Le phosphore salivaire constitue en outre la source essentielle de satisfaction des besoins élevés des bactéries du rumen. Parmi les facteurs de variation du besoin net d'entretien en phosphore, seule la quantité de matière sèche ingérée (MSI) est prise en compte dans les recommandations; il est vrai que la perte fécale endogène varie linéairement avec ce paramètre. Pour ce qui concerne la nature et la structure de la ration (F/C, granulométrie, densité énergétique...), les informations sont encore insuffisantes pour un meilleur paramétrage. Dans ce domaine, la proposition de l'AFRC (1991) paraît intéressante : le besoin d'entretien, estimé à partir de la MSI est multiplié par 1,6 lorsque le rendement de transformation de l'énergie brute en énergie métabolisable est inférieur à 0,7 (ce qui correspond approximativement à 50 % et plus de fourrage dans la ration). Cette première approche est peut être un peu brutale mais mérite d'être approfondie, la réalité étant probablement plus progressive.

**Le besoin net d'entretien en calcium** est insensible aux facteurs de variations rencontrés avec P à l'exception toutefois de la MSI qui est le critère déterminant des pertes endogènes de Ca. De même les pertes endogènes en Mg, K et Na ne suscitent pas de commentaire particulier et les valeurs retenues font l'objet d'un bon accord international et ne sont pas affectées par les caractéristiques de la ration.

**Le besoin net de gestation** correspond à la minéralisation du (ou des) fœtus et il ne devient significatif que pendant le dernier tiers de la gestation. Il concerne surtout Ca et P et représente une exportation très importante : environ 600 g de Ca et 350 g de P pour les bovins et 50 g de Ca et 30 g de P pour les petits ruminants, dans le cas de naissance unique (Guéguen *et al*, 1988).

**Le besoin net de croissance** correspond à la minéralisation du squelette (Ca, P et Na) et des tissus mous (Mg, K et Na). Compte tenu de l'évolution de la composition du dépôt corporel, le besoin net de croissance diminue : de 15 à 10 g de Ca, de 8 à 5 g de P, 0,4 g de Mg, 1,8 à 1,6 g de K et 1,4 à 0,9 g de Na par kg de croît.

**Le besoin net de lactation** constitue une exportation nette qui est directement déduite de la composition minérale du lait. Les valeurs moyennes (tableau 1) varient peu avec le type de ration mais peuvent évoluer selon le taux de matières azotées du lait (race, stade de production).

Tableau 1  
Composition minérale moyenne du lait (en g/kg)  
(Guéguen, 1996)

	Vache	Brebis	Chèvre
Ca	1,20	1,95	1,25
P	0,92	1,50	0,97
Mg	0,12	0,18	0,13
K	1,50	1,40	1,90
Na	0,45	0,46	0,38
Cl	1,10	1,10	1,60

Contrairement au besoin net d'entretien, ces besoins nets de production sont peu variables et leur estimation, qui fait l'objet d'un bon accord international, peut aujourd'hui être considérée comme fiable et précise.

### 1.1.2. L'absorption réelle

Le coefficient d'absorption réelle (CAR) représente la fraction de l'apport alimentaire véritablement disponible pour la satisfaction des BPN. Sa mesure consiste en un bilan entre la quantité ingérée (ing) et l'excrétion fécale d'origine alimentaire c'est-à-dire l'excrétion fécale totale (F) diminuée de la part endogène (fe) :

$$\text{CAR} = \frac{\text{ing} - (\text{F} - \text{fe})}{\text{ing}} \times 100$$

La mesure de la fraction endogène est rendue possible par l'utilisation de traceurs radioactifs ( $^{32}\text{P}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ...). La valeur obtenue résulte de la *capacité d'absorption du tube digestif*, caractéristique de l'animal et de son état physiologique, et de l'*absorbabilité* de l'apport alimentaire qui dépend de la source minérale et de la ration.

Les facteurs de variation liés à l'animal sont bien pris en considération par les systèmes de recommandation ; ainsi, le fait que l'efficacité de l'absorption diminue avec l'âge, ou au contraire augmente chez la femelle en lactation conduit à moduler la valeur du CAR retenue pour le calcul des besoins selon le stade physiologique (Guéguen *et al.*, 1988). L'adaptation digestive de l'animal en production n'est pas immédiate, elle n'intervient que vers la mi-lactation ce qui implique la participation des réserves minérales osseuses à la couverture des BPN. De plus, la prise en compte de ce processus dans les recommandations INRA de 1988 a été extrapolée des travaux de Braithwaite (1983) sur brebis laitière. Il serait utile de préciser l'ampleur et la durée du cycle de mobilisation en début de lactation-restauration des réserves minérales osseuses pendant la seconde partie de la lactation avec des animaux plus productifs et dont la persistance et la durée de lactation sont plus élevées.

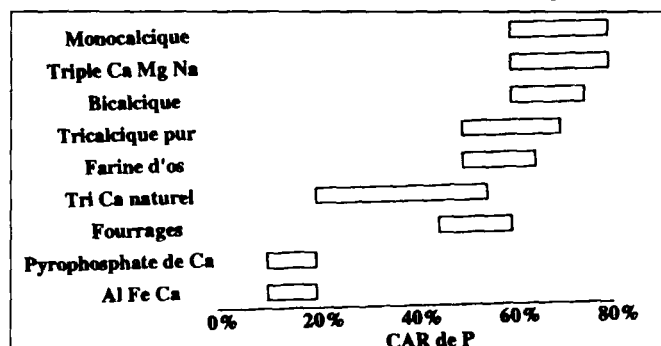
La composante « aliment » de l'absorption réelle est susceptible d'importantes variations selon le niveau et la source de l'apport et les interactions qui peuvent exister avec les autres ingrédients, minéraux ou non de la ration.

Pour le calcium, un apport largement supérieur aux besoins se traduit rapidement par une détérioration de l'efficacité de l'absorption intestinale ; inversement, un apport insuffisant entraîne une augmentation de l'absorption réelle (Braithwaite, 1983). Les autres éléments minéraux majeurs sont beaucoup moins sensibles à cet effet, un apport élevé ne modifie pas l'efficacité de l'absorption, un système de régulation, le plus souvent rénal, étant alors sollicité pour éliminer l'excédent absorbé (Mg, K et Na).

Les variations de l'absorption réelle selon la nature de la source peuvent être très importantes : les phosphates inorganiques (figure 2) présentent une étendue de variation de leur CAR allant de moins de 20 % à plus de 75 %.

Figure 2

Variations du CAR selon la nature de la source de phosphore



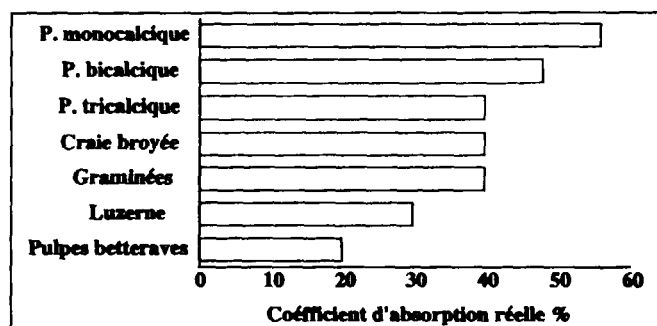
Il apparaît que selon la source utilisée, le bénéfice pour l'animal peut être extrêmement variable ainsi, bien entendu, que l'impact sur l'environnement puisque les quantités non absorbées par l'animal viennent grossir le flux des rejets polluants. Aujourd'hui, une très grande majorité de fabricants d'aliments

minéraux utilisent des phosphates de bonne qualité nutritionnelle, ce qui n'a pas toujours été le cas. Il existe moins d'information sur l'absorbabilité des sources organiques de phosphore, notamment concernant les céréales et les tourteaux. L'hypothèse selon laquelle la totalité du phosphore phytique de ces matières premières est hydrolysée par l'action enzymatique des bactéries du rumen mérite d'être vérifiée surtout dans le cas d'apport massif de phosphore phytique avec des rations riches en aliments concentrés. Pour les fourrages, il ne semble pas y avoir de différences sensibles entre les diverses familles botaniques bien que là encore l'information scientifique est peu abondante.

Les sources de calcium (figure 3) présentent une variabilité moindre que celles de P. Le calcium des phosphates calciques est légèrement mieux absorbé que celui des carbonates qui demeurent néanmoins de bonnes sources, peu onéreuses.

Figure 3

Variations de l'absorption de Ca selon la source



L'absorbabilité du calcium des fourrages est également susceptible de variations non négligeables ; le CAR moyen du calcium des graminées est de l'ordre de 40 % mais est supérieure pour les végétaux jeunes (Thomson *et al.*, 1988). Le calcium des légumineuses (Ward *et al.*, 1979 ; Martz et Bello, 1990) et surtout celui des pulpes de betteraves (Meschy *et al.*, 1993) est nettement moins disponible.

Certains résultats (Ammermann et Chicco, 1968 ; Meschy 1998) indiquent que l'absorption des phosphates de magnésium ou complexes est supérieure à celle de l'oxyde de magnésium (ou magnésie calcinée) ; pour ce dernier, la présentation physique et en particulier la granulométrie est un facteur déterminant : les particules fines étant sensiblement mieux utilisées par l'animal (Jesse *et al.*, 1981 ; Wilson et Ritchie, 1981).

L'absorption de K et Na est toujours élevée (80-90 %), sans influence notable de l'origine.

L'absorption d'un élément peut aussi être modifiée par d'autres composants de la ration. Une des plus classiques situations d'interférence, pour les éléments majeurs, concerne l'absorption du magnésium qui intervient principalement dans le rumen et dont l'efficacité dépend fortement des conditions qui y règnent. Ainsi, l'absorption de Mg diminue quasi-linéairement avec la teneur en K de la ration (Greene *et al.*, 1983) ou sa concentration dans le rumen (Fontenot *et al.*, 1989). En revanche, une supplémentation énergétique, quelle que soit sa nature, se traduit par une augmentation de l'absorption de Mg dans le rumen (Rémond *et al.*, 1996).

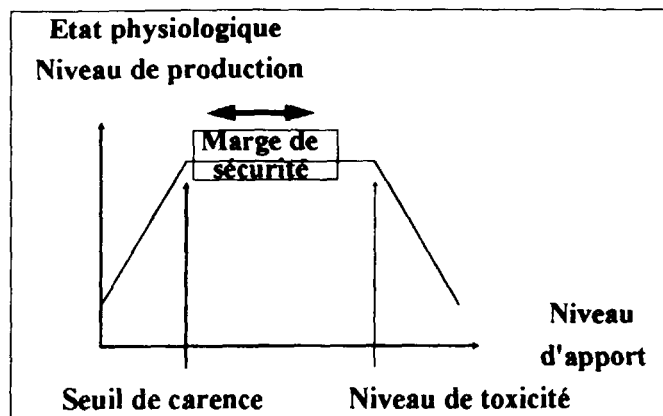
Un apport alimentaire élevé d'aluminium diminue l'absorption de P. Il se forme avec les phosphates solubles présents dans la ration et dans la salive un phosphate d'aluminium insoluble et par conséquent inabsorbable. Ce risque d'interférence existe principalement dans notre pays en cas d'utilisation abusive de sulfate d'aluminium utilisé comme adjuvant de surpressage des pulpes de betteraves (Demarquilly *et al.*, 1978 ; Meschy et Duval, 1988).

Les facteurs de variation de l'absorbabilité de l'apport alimentaire (nature de la source + interférences éventuelles) n'est pas aujourd'hui prise en compte dans les systèmes de recommandations qui en font une estimation approximative en faisant porter sur le CAR une marge de sécurité (de l'ordre de 10-15 %) supposée prendre en compte ces variations ainsi que les réponses individuelles.

## 1.2. OLIGO-ÉLÉMENTS

Pour des raisons techniques, il n'est pas possible d'employer la méthode factorielle pour la détermination des besoins en soufre et oligo-éléments. Une méthode plus globale du type « dose-réponse » est mise en œuvre (figure 4).

Figure 4  
Évaluation du besoin en oligo-éléments



Cette mesure consiste à évaluer la concentration optimale d'un élément dans le régime sur la base de critères synthétiques (performances zootechniques) ou plus spécifiques (symptômes cliniques spécifiques d'une déficience, activités enzymatiques). Cette méthode permet de définir un seuil de carence (concentration d'un élément à partir de laquelle les symptômes de carence disparaissent) et un niveau de toxicité (tableau 2). Selon les éléments l'écart est très différent : d'un facteur 100 pour le cobalt et de 3 à 5 seulement pour le cuivre par exemple.

Tableau 2  
Recommandations d'apport en oligo-éléments (en mg par kg) de MS de la ration totale (Guéguen et al, 1988)

Élément	Limite de carence	Apport recommandé	Seuil de toxicité
Cuivre	7	10	15-30 (1)
Zinc	45	50	250
Manganèse	45	50	1000
Cobalt	0,07	0,1	10
Sélénium	0,1	0,1	0,5
Iode	0,15	0,2-0,8 (2)	8

(1) 15 pour les ovins et 30 pour les bovins

(2) Selon le niveau de production

La recommandation en fer n'apparaît pas bien que cet élément soit indispensable aux ruminants comme aux autres espèces animales. Ce besoin, de l'ordre de 50 mg/kg MS, est largement satisfait par les rations usuelles contenant suffisamment de fourrages.

Le principal problème de l'alimentation en oligo-éléments du ruminant est celui des interactions avec les composants, minéraux ou non, des rations. Ces interférences peuvent entraîner une baisse de l'absorption ou de l'utilisation métabolique de certains éléments. Il est bien connu qu'un excès de soufre et de molybdène diminue fortement l'absorption du cuivre par la formation de molécules insolubles (sulfure et thiomolybdate de cuivre). L'absorption du cuivre (A) peut être prédite par les teneurs en S (g/kg de MS) et Mo (mg/kg de MS) de la ration (Suttle et McLauchlan, 76) :

$$\log A = -0,076 S - 0,013 (S \times Mo) - 1,153$$

Dans le même esprit, le NRC (1989) a réévalué le besoin en Se de 0,1 à 0,3 ppm pour tenir compte d'éventuelles interactions (teneurs élevées en matières grasses, soufre ou nitrates). Les apports d'iode peuvent être augmentés (de 1 mg/kg de MS) en présence de substances goitrogènes dans la ration (chou, colza). Fer, cuivre, zinc (et cadmium) possèdent les mêmes transporteurs intestinaux, ce qui explique que l'excès de l'un d'entre eux peut induire une carence par défaut d'absorption des autres. Il n'est pas rare par exemple que dans certaines régions où l'eau est naturellement riche en fer de constater une fré-

quence anormalement élevée des déficiences en cuivre avec ses conséquences sur la reproduction notamment.

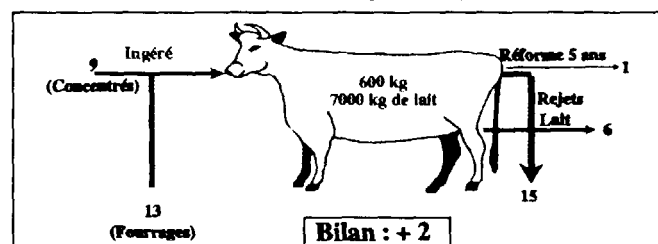
L'effet de l'excès de calcium sur l'absorption des oligo-éléments (Cu et Zn) est beaucoup plus discuté. Il semble en effet que si les sources complémentaires, et en particulier le carbonate, dépriment l'absorption, il n'en soit pas de même pour le calcium des légumineuses ou des pulpes de betteraves (ARC, 1980).

## 2. ALIMENTATION MINÉRALE ET POLLUTION : EXEMPLE DU PHOSPHORE

Les recommandations d'apports de nutriments visent la satisfaction des besoins des animaux dans un objectif de santé et de production ; des considérations écologiques nous amènent aujourd'hui à réduire, autant que faire se peut, les quantités d'éléments potentiellement polluants (azote, phosphore, et cuivre dans le cas des élevages de monogastriques) dans les effluents d'élevage, ce qui revient à introduire une notion de rendement à la satisfaction des besoins nutritionnels des animaux, jusqu'ici considérée en quantités absolues. En effet, le médiocre rendement d'utilisation du phosphore (selon les espèces, 60 à 75 % de l'apport alimentaire est excrété) conduit à un rejet annuel de l'ordre de 300 000 tonnes de P dans les déjections animales (Guéguen, 1993). Les ruminants participent pour les deux tiers environ à cette charge polluante mais il faut aussi considérer qu'ils sont associés à des surfaces fourragères susceptibles de valoriser ces rejets.

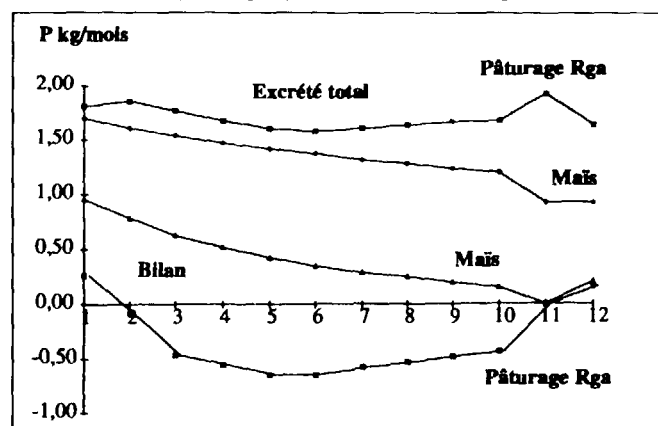
Il convient donc d'analyser le problème sous l'angle d'un bilan au niveau de l'exploitation agricole. Dans l'exemple de la figure 5, le bilan de + 2 kg de P par an est établi par la différence entre les « entrées » alimentaires provenant ou non de l'exploitation et les « sorties » représentées par les exportations dans le lait et dans la carcasse au moment de la réforme de l'animal d'une part et les restitutions à l'exploitation d'autre part.

Figure 5  
Bilan annuel du phosphore (kg de P)



Ce bilan peut être modifié par la nature de la ration : l'apport de P par les fourrages peut ainsi passer de 50 % environ (ensilage de maïs) à plus de 90 % (pâturage de ray-grass anglais). La part des compléments (concentrés et aliment minéral) importés dans l'exploitation vient aggraver le bilan. La figure 6 illustre la nécessité de distinguer ce bilan d'exploitation par animal présent des rejets totaux.

Figure 7  
Bilan mensuel du phosphore : comparaison ensilage de maïs-pâturage (production de 7500 kg de lait)



Si la quantité de P excrétée est toujours supérieure dans le cas du pâturage (apports pléthoriques à certaines périodes), le bilan au niveau de l'exploitation est toujours nettement inférieur et le plus souvent négatif ce qui indique des prélèvements supérieurs aux restitutions.

Bien que nous ne soyons pas encore en mesure de prendre en compte les facteurs de variation des pertes endogènes (dont la fraction excrétoire constitue une véritable charge polluante) et de l'absorption réelle, une analyse de rations-types, sur la base de ce qui a été réalisé pour les rejets azotés (Delaby *et al.*, 1995) a permis d'identifier les facteurs susceptibles de modifier la pression de pollution, et notamment le niveau de la production laitière (tableau 3).

**Tableau 3**  
Bilan annuel de P (kg) selon le niveau de la production laitière (PL) avec des rations maïs ensilage

	PL 6000 kg	PL 7500 kg	PL 9000 kg
Maïs	13,3	13,2	13,0
Concentrés	2,1	4,1	6,2
Minéraux	6,2	7,4	6,6
Ingéré total	21,6	24,7	27,4
Fèces	14,2	15,4	16,7
Urine	2	2,3	2,6
Lait	5,4	6,8	19,3
Excrété total	16,2	17,7	19,3
Bilan (1)	1,9	3,5	5,3
Rejet/t lait	0,32	0,47	0,90

(1) Bilan de l'exploitation, compte tenu d'une exportation annuelle de 1 kg de P/réforme

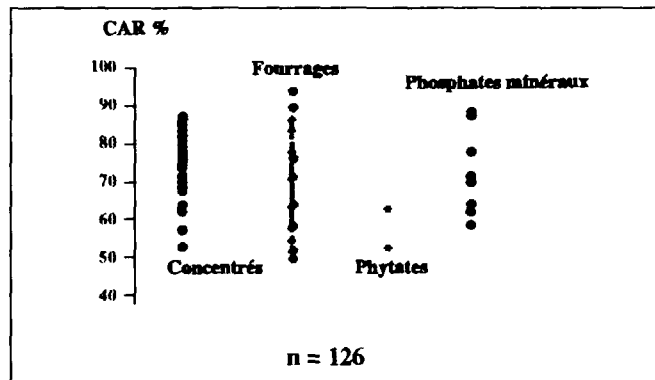
La quantité totale de P excrétée augmente avec l'intensification de la production laitière ce qui est conforme aux observations de Delaby *et al.* (1995) pour les rejets azotés. Pour le bilan de P, ceci résulte à la fois de la diminution de la part de l'apport alimentaire fournie par l'exploitation et de l'augmentation des rejets, proportionnelle aux quantités de P ingéré (et donc du niveau de production). Contrairement à ce qui est observé pour l'azote, il n'y a pas de « compensation » puisque la quantité totale de P rejeté ramené à la tonne de lait produite augmente de façon quasi-linéaire avec le niveau de production (tableau 3).

Des simulations analogues peuvent être faites pour les animaux en croissance, les tendances étant similaires : nature de la ration et niveau de production sont déterminants en terme de pression de pollution.

Le faible rendement de l'utilisation du phosphore par l'animal incite à rechercher des solutions nutritionnelles pour l'améliorer. En premier lieu, **le niveau de l'apport alimentaire** doit respecter au mieux les besoins. Comme pour l'azote (Peyraud *et al.*, 1995), tout apport pléthorique se traduit par une augmentation des rejets (70 à 80 % de l'excédent de P sont éliminés) ; un apport excessif est donc une faute écologique et très souvent de plus une erreur économique. Inversement, il serait tentant de penser qu'il suffit de réduire les apports pour diminuer les rejets mais ce n'est pas toujours le cas et, de plus, le risque de diminuer l'efficacité de la ration suite à une subcarance en P des bactéries du rumen est loin d'être négligeable. Il est néanmoins possible que la marge de sécurité incluse dans les recommandations d'apport soit parfois assez « confortable » et qu'elle puisse être réduite, ce qui suppose par exemple une meilleure prise en compte des variations de l'absorption réelle de P. **La qualité de l'apport alimentaire** est également concernée et des progrès importants ont été accomplis ces dernières décennies dans notre Pays dans l'utilisation de phosphates inorganiques de bonne valeur nutritionnelle pour la fabrication des aliments minéraux. L'évaluation de la qualité nutritionnelle du phosphore des aliments de base des ruminants est plus délicate. La figure 7 présente les valeurs de CAR de P des aliments des ruminants regroupés en grandes familles. L'étendue des plages de variation indique clairement que ce regroupement est beaucoup trop grossier pour être exploité dans son état actuel. L'analyse des conditions expérimentales ayant conduit à ces valeurs aura pour objet d'identi-

fier les paramètres majeurs conduisant à ces variations. A titre d'exemple, parmi le peu de données existantes sur l'utilisation du phosphore phytique chez le ruminant, les faibles valeurs de la figure 7 (Tillman et Brethour, 1958) doivent nous amener à vérifier l'activité phytasique dans le rumen d'animaux recevant des quantités élevées de phosphore phytique.

**Figure 7**  
Variation de l'absorption réelle de P des aliments des ruminants (synthèse bibliographique)



La prise en compte des facteurs de variation du CAR et de ceux de l'efficacité du métabolisme P doit permettre l'évolution des recommandations d'apport alimentaire en P visant également à la prévision et donc à l'optimisation des rejets en phosphore des effluents d'élevage des ruminants.

## CONCLUSIONS

Les systèmes de recommandations d'apport minéral aux ruminants ont été établis pour un animal « moyen », placé dans des conditions sanitaires et alimentaires « normales » et avec un objectif d'optimisation quantitative des productions animales. Cette simple définition indique qu'aujourd'hui ces systèmes, bien qu'ayant permis les progrès que nous connaissons dans le domaine de l'alimentation animale, atteignent certaines de leurs limites aussi bien en termes de progrès génétique que de conditions de production. Les animaux les plus productifs sont souvent (et presque toujours à certains stades de production) à la marge entre le sain et le pathologique. Qu'en est-il par exemple de la satisfaction du besoin en phosphore des bactéries d'un rumen en (sub) acidose plus ou moins marquée ? La même question se pose peut-être pour d'autres éléments (Zn et renouvellement épithélial par exemple). Enfin les rations de vaches laitières, notamment en début de lactation sont elles véritablement des situations alimentaires « normales » pour des ruminants ?

Tout ceci signifie que les systèmes doivent évoluer vers la prise en compte des éléments qui les écartent des situations pour et dans lesquelles ils ont été élaborés.

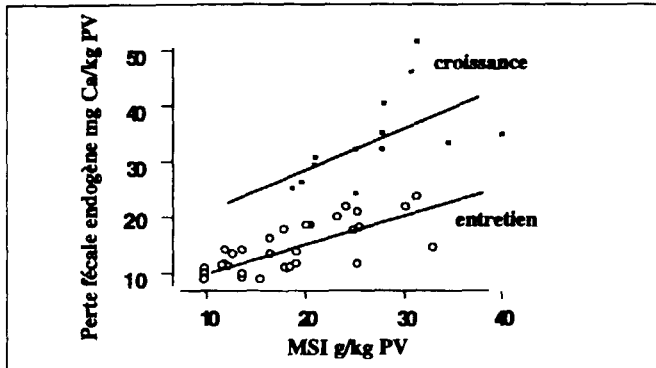
La principale critique qui peut aujourd'hui être faite au paramétrage de méthode factorielle est qu'il ne retient que des valeurs uniques (ou très peu variables) pour chacune de ses étapes. Les résultats expérimentaux permettent d'identifier, et parfois de commencer à quantifier, un certain nombre de facteurs de variation de l'endogène ou de l'absorption réelle. Une approche quantitative doit permettre de mieux cerner les lois de réponse de l'animal aux variations de l'apport alimentaire et de les intégrer.

Ceci implique probablement, ne serait-ce que pour valider ces lois, un nouveau développement de l'activité expérimentale. Ainsi, des informations complémentaires sur le cycle de mobilisation-restauration des réserves minérales osseuses (Ca et P) chez la femelle au cours de la lactation sont nécessaires. En 1988, les recommandations de l'INRA ont bien pris en compte ce processus mais à partir de travaux réalisés chez la brebis (Braithwaite, 1983). Il serait utile de vérifier l'amplitude et la durée de ces phénomènes avec des animaux plus productifs et dont la persistance de lactation est plus élevée.

Parmi d'autres questions, on pourrait citer la concurrence des besoins d'entretien et de production, l'analyse des besoins

d'entretien en Ca (figure 8) indiquant qu'ils sont supérieurs pour les agneaux en croissance comparés aux moutons à l'entretien.

**Figure 8**  
Effet du stade physiologique sur la perte fécale endogène de calcium chez les ovins



Il est certain que des informations doivent continuer à être recueillies sur la qualité des matières premières utilisées pour la complémentation minérale des rations et sur les interactions minérales (P, Ca, Mg et oligo-éléments)...

Un autre point qui mérite d'être pris en considération concerne les objectifs de l'élevage moderne : au delà de la préoccupation productiviste qui nous anime depuis plusieurs décennies (les systèmes actuels s'inscrivent prioritairement dans ce cadre, et c'est légitime), l'élevage devra répondre de plus en plus à d'autres questions. La première concerne l'environnement et notamment la maîtrise des rejets de P dans les effluents d'élevage.

Avant d'envisager des modèles mécanistes des métabolismes minéraux qui se heurtent aujourd'hui à la prise en compte du sous système régulateur pour le court terme et surtout pour le long terme, faute de données expérimentales, des améliorations à plus court terme des systèmes de recommandation d'apport alimentaire résident dans un meilleur paramétrage de l'approche factorielle.

AFRC, Agricultural and Food Research Council, 1991. Nutrition Abstracts and Reviews (Series B), 61, 573-612.  
 Ammerman C. B., Chicco C. F., 1968. J. Anim. Sci. 27, 288.  
 ARC, Agricultural Research Council, 1965. The Nutrient Requirements of Farm Livestock No 2 Ruminants. HMSO, London.  
 ARC, Agricultural Research Council, 1980. The Nutrient Requirements of Farm Livestock. Commonwealth Agricultural Bureaux, Slough.  
 Braithwaite G. D., 1983. Br. J. Nutr., 50, 723-736.  
 Braithwaite G. D., 1985. J. Agric. Sci., 105, 67-72.  
 Bravo D., Meschy F., Bogaert C. et Sauvart D., 1998. Renc. Rech. Ruminants, 5, (sous presse).  
 Delaby L., Peyraud J.-L. et Verité R., 1995. Renc. Rech. Ruminants, 2, 349-354.  
 Demarquilly C., Grenet E., Lamand M., Barlet J.-P. et Le Du J., 1978. Bull. tech. CRVZ Theix, INRA, 32,  
 Fontenot J.-P., Allen V.-G., Bunce G. E. et Goff J.-P., 1989. J. Anim. Sci., 67, 3445-3455.

Grace N. D., 1981. Br. J. Nutr., 45, 367-374.  
 Greene L. W., Fontenot J.-P. et Webb K. E., 1983. J. Anim. Sci., 57, 503-510.  
 Guéguen L., 1963. Ann. Biol. anim. Bioch. Biophys. 3, 243-253  
 Guéguen L., 1993. Bien nourrir les animaux en minéraux. II Pour préserver la santé de l'Homme et son environnement. Vitolmin, AFCA, Angers.  
 Guéguen L., 1996. In INRA (ed) Actes du colloque Le lait de chèvre, un atout pour la santé.  
 Guéguen L., Lamand M. et Meschy F., 1988. In Jarrige, R. (ed), Alimentation des bovins, ovins & caprins. 95-111. INRA, Paris.  
 INRA, 1978. Alimentation des ruminants. INRA Publication, Versailles.  
 INRA, Institut National de la Recherche Agronomique, 1988. Alimentation des bovins, ovins et Caprins R. Jarrige (ed.). INRA Publications, Paris.  
 Jesse B. W., Thomas W. et Emery R. S., 1981. J. Dairy Sci., 64, 197-205.  
 Martz F. A., Belo A. T., Weiss M. F., Belyea R. L. et Goff J.-P., 1990. J. Dairy Sci., 73, 1288-1295.  
 Meschy F., 1998. Renc. Rech. Ruminants, 5, (sous presse).  
 Meschy F. et Duval S., 1988. INRA Prod. Anim., 1, 339-343.  
 Meschy F., Faurie F. et Guéguen L., 1993. INRA Prod. Anim., 1, 47-51.  
 Meschy F. et Peyraud J.-L., 1998. Renc. Rech. Ruminants, 5, (sous presse).  
 NRC, National Research Council, 1971. Nutrient requirements of dairy cattle. National Academy of Sciences, Washington, D.C.  
 NRC, National Research Council, 1974. Nutrient requirements of beef cattle. National Academy Press, Washington, D.C.  
 NRC, National Research Council, 1989. Nutrient requirements of dairy cattle. National Academy Press, Washington, D.C.  
 Peyraud J.-L., Verité R., Delaby L., 1995. Fourrages, 142, 131-144.  
 Remond D., Meschy F. et Boivin R., 1996. Ann. Zootech., 45, 97-119.  
 Scott D. et Buchan W., 1985. Q. J. Exp. Physiol., 70, 365-375.  
 Scott D. et Buchan W., 1987. Q. J. Exp. Physiol., 72, 331-338.  
 Scott D. et Buchan W., 1988. Q. J. Exp. Physiol., 73, 315-322.  
 Scott D. et McLean A.F., 1981. Proc. Nut. Soc., 40, 257-266.  
 Suttle N. F. et McLauchlan M., 1976. Proc. Nut. Soc., 35, 11A-23A.  
 Ternouth J. H., 1989. J. Agric. Sci., 113, 291-297.  
 Thomson J. K., Gelman A. L. et Weddel J. R., 1988. Anim. prod., 46, 291-297.  
 Tillman A.D., Brethour J. R., 1958. J. Anim. Sci. 17, 104-108  
 Ward G., Harbers L. H. et Blaha J.-J., 1979. J. Dairy Sci. 62, 715-722.  
 Wilson C. L. et Ritchie N. S., 1981. J. Sci. Food Agric., 32, 993-994.