

Savoir
faire

Nutrition minérale des ruminants

Nouvelle édition

François Meschy



éditions
Quæ

Nutrition minérale des ruminants

Nouvelle édition

François Meschy

Éditions Quæ

Collection « Savoir-faire »

Pesticides en viticulture. Usages, impacts et transition agroécologique

F. Macary (auteur), S. Le Foll (préfacier), 2023, 232 p.

Crises sanitaires en agriculture

Les espèces invasives sous surveillance

C. Lannou, J.-Y. Rasplus, S. Soubeyrand, M. Gautier, J.-P. Rossi, coord.,
2023, 326 p.

Oil Palm Fertilization Guide

B. Dubos, X. Bonneau, A. Flori, T. Durand-Gasselín (préfacier), 2022, 82 p.

Les agricultures urbaines en France

Comprendre les dynamiques, accompagner les acteurs

C. Aubry, G. Giacche, F. Maxime, C.-T. Soulard, coord., 2022, 224 p.

Life Cycle Assessment of agri-food systems

An operational guide dedicated to developing and emerging economies

C. Basset-Mens, A. Avadi, C. Bessou, I. Acosta-Alba, Y. Biard, S. Payen
2022, 210 p.

Spillways on River Levees

G. Degoutte, R. Tourment

2021, 176 p.

L'immunité des plantes

Pour des cultures résistantes aux maladies

C. Lannou, D. Roby, V. Ravigné, M. Hannachi, B. Moury
2021, 392 p.

Pour citer cet ouvrage :

Meschy F., 2023. *Nutrition minérale des ruminants* (nouvelle édition),
Versailles, éditions Quæ, 244 p.

La première édition de cet ouvrage date de 2010. En 2017, une nouvelle version a été publiée au format ePub. La présente édition intègre des modifications supplémentaires.

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex
www.quae.com | www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2023

ISBN papier : 978-2-7592-3694-7

ISBN PDF : 978-2-7592-3695-4

ISBN ePub : 978-2-7592-3696-1

ISSN : 1952-1251

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants-droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction même partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Table des matières

Avant-propos	9
Introduction	11
1. Les éléments minéraux dans l'écosystème ruminal	17
Méthodes expérimentales	17
Contrôle des constantes physico-chimiques du rumen	19
Nutrition minérale des micro-organismes du rumen	23
Phosphore	23
Soufre	31
Cobalt	35
2. Éléments minéraux majeurs	39
Considérations générales	39
Phosphore et calcium	45
Rôles physiologiques	46
Absorption et excrétion	47
Homéostasie	54
Troubles de la régulation.....	56
Carences, excès et indicateurs du statut nutritionnel	60
Apports journaliers recommandés	62
Apports alimentaires.....	68
Magnésium	73
Rôles physiologiques	73
Absorption, excrétion et homéostasie	73
Carences, excès et indicateurs du statut nutritionnel	77
Apports journaliers recommandés	81
Apports alimentaires.....	81
Électrolytes : potassium, sodium et chlore	82
Potassium.....	84
Sodium et chlore	87
Équilibre électrolytique	91
Apport alimentaire	103
3. Soufre et oligoéléments	109
Soufre	113
Cobalt	116

Cuivre	119
Rôles physiologiques	119
Absorption, excrétion et homéostasie	121
Carences, excès et indicateurs du statut nutritionnel	124
Apports journaliers recommandés	127
Apports alimentaires.....	127
Fer	127
Iode	129
Rôles physiologiques	130
Absorption, excrétion et homéostasie	130
Carences, excès et indicateurs du statut nutritionnel	131
Apports journaliers recommandés	135
Apports alimentaires.....	135
Manganèse	136
Rôles physiologiques	136
Absorption, excrétion et homéostasie	137
Carences, excès et indicateurs du statut nutritionnel	138
Apports journaliers recommandés	140
Apports alimentaires.....	140
Sélénium	141
Rôles physiologiques	141
Absorption, excrétion et homéostasie	143
Carences, excès et indicateurs du statut nutritionnel	144
Apports journaliers recommandés	148
Apports alimentaires.....	149
Zinc	149
Rôles physiologiques	150
Absorption, excrétion et homéostasie	151
Carences, excès et indicateurs du statut nutritionnel	152
Apports journaliers recommandés	155
Apports alimentaires.....	155
Oligoéléments potentiellement essentiels ou toxiques	156
Oligoéléments essentiels secondaires	156
Oligoéléments toxiques	160
4. Considérations pratiques	165
Choix de l'aliment minéral	166
Estimation de l'apport minéral par la ration	166
Calcul de la formule et de la quantité à distribuer	167

Valeur nutritionnelle de l'aliment minéral	168
Sources d'éléments minéraux majeurs	169
Sources d'oligoéléments	172
Modalités de la complémentation minérale des rations	175
Complémentation minérale en stabulation	175
Complémentation minérale au pâturage	176
Références bibliographiques	181
Glossaire	223
Annexes.....	229
Annexe 1 – Base de données phosphore.....	229
Annexe 2 – Base de données magnésium	235
Annexe 3 – Base de données électrolytes	238
Annexe 4 – Exemple de complémentation minérale	240

Avant-propos

Plusieurs constats sont à l'origine du projet de rédaction de cet ouvrage.

L'alimentation minérale est souvent le « parent pauvre » de la formation initiale agronomique et vétérinaire, alors qu'elle représente un secteur techniquement et économiquement important dans les élevages, notamment intensifs, de ruminants.

L'accès à une information technique et scientifique objective en langue française n'est pas toujours facile. Dans les années soixante, l'Association des fabricants de compléments pour l'alimentation animale avait publié un manuel pratique sur l'alimentation minérale des animaux d'élevage (AFCA, 1960). Dans sa première édition, le « livre rouge » de l'Inra sur l'alimentation des ruminants (Inra, 1978) faisait la part belle au sujet (55 pages et de nombreux tableaux) mais répartie en une douzaine de chapitres, ce qui ne facilitait pas la recherche d'information. Néanmoins, cet ouvrage constitue toujours une référence de base. Une synthèse très complète est parue plus récemment : *Les oligoéléments en médecine et biologie* (Chappuis, 1991). Mais comme son titre l'indique, elle ne concerne d'une part que les oligoéléments et, d'autre part, n'est pas à vocation zootechnique. Le lecteur y trouvera cependant des compléments très utiles dans les domaines de la physiologie animale et de la biochimie.

Quelques ouvrages de synthèse consacrés à la nutrition minérale des animaux d'élevage sont disponibles en langue anglaise (Underwood et Suttle, 1999 ; NRC, 2001 ; McDowell, 2003 ; NRC, 2007 ; Suttle, 2010). Assez complets, ils ignorent, à quelques rares exceptions près, la production scientifique européenne de langue française. Ainsi le présent ouvrage consacre-t-il un chapitre complet à la relation entre les éléments minéraux et la vie microbienne dans le rumen. Cette thématique a en effet suscité une activité scientifique notable en France alors qu'elle est à peine évoquée dans les publications anglo-saxonnes.

Cette nouvelle édition propose une actualisation des données à la lumière de la production scientifique de ces dernières années. Un paragraphe est également dédié au fer, rarement évoqué dans les ouvrages consacrés aux ruminants adultes. En effet, si les carences sont rarissimes dans des

conditions alimentaires courantes, le risque de toxicité n'est pas négligeable dans certaines régions françaises et méritait d'être précisé.

Par ailleurs, il existe un fossé, parfois considérable, entre les faits scientifiquement avérés et ceux qui circulent sur le terrain (et sur internet !).

Ce livre se propose de fournir une information objective et actualisée sur le sujet aux techniciens de l'alimentation animale au sens large, mais aussi, bien entendu, aux éleveurs, aux enseignants et aux étudiants des filières agronomique et vétérinaire. S'il ne s'agit donc pas d'un traité de physiologie animale, et encore moins de biochimie, quelques éléments sont cependant rappelés lorsqu'ils sont susceptibles d'expliquer leurs conséquences zootechniques. Enfin, l'ouvrage se limite volontairement aux ruminants sevrés.

Chaque élément minéral présentant un intérêt nutritionnel est traité sous l'angle de ses rôles au sein de l'organisme, de son utilisation digestive, des conséquences d'une alimentation inadaptée insuffisante ou excessive. Les apports journaliers recommandés et ceux permis par les différents aliments sont également abordés.

L'auteur livre enfin dans un dernier chapitre ses réflexions d'ordre pratique inspirées par 25 années d'activité professionnelle à l'Inra dans le domaine de l'alimentation minérale des ruminants.

En espérant que dans ce secteur, la recherche publique française maintienne et renforce sa place dans la communauté scientifique internationale et qu'elle continue, par la diffusion de ses résultats originaux, de contribuer au développement d'élevages performants respectueux de l'environnement.

Introduction

Tous les êtres vivants contiennent des proportions variables d'éléments minéraux dont certains sont essentiels à la réalisation des fonctions biologiques vitales. Une vingtaine d'éléments sont considérés comme indispensables (Underwood et Suttle, 1999 ; McDowell, 2003 ; Suttle, 2010) et une quinzaine présentent un réel intérêt en nutrition animale. Le caractère nécessaire de certains d'entre eux (étain, vanadium, silicium, nickel et arsenic) a bien été démontré chez les animaux de laboratoire, mais ils ne font pratiquement jamais défaut en élevage du fait de la contamination, au bon sens du terme, environnementale.

Les éléments minéraux dans la nutrition des ruminants

Un élément est considéré comme indispensable lorsque son insuffisance dans le régime alimentaire conduit à des perturbations plus ou moins graves des voies métaboliques, et que ces dysfonctionnements cessent avec l'addition de l'élément considéré. Les éléments minéraux sont présents en quantités extrêmement variables dans l'organisme : un bovin adulte contient une dizaine de kg de calcium mais seulement quelques dizaines de mg d'iode ou de cobalt. Les éléments minéraux sont habituellement répartis en éléments majeurs (ou macroéléments), présents en quantités importantes dans l'organisme et dont l'apport alimentaire s'exprime en g/kg de matière sèche de la ration (MS), et en oligoéléments (aussi appelés « éléments trace métalliques »), quantitativement beaucoup moins représentés et dont l'apport alimentaire s'exprime en ppm ou en mg/kg de MS. Les minéraux sont très inégalement répartis dans les différents tissus : environ 83 % dans l'os, 10 % dans le muscle et les 7 % restants dans la peau, le sang, le cerveau et les viscères. La concentration et la localisation minérales sont assez constantes dans l'organisme des différents mammifères : le tableau 1 présente la classification et l'abondance des éléments minéraux essentiels.

Les éléments minéraux assurent des fonctions variées au sein de l'organisme : ils contribuent à la structure des différents tissus (squelette, muscles, architecture cellulaire), interviennent dans le maintien des grands équilibres biologiques (acido-basique et osmotique en particulier), exercent un rôle catalytique dans les systèmes enzymatiques et hormonaux et régulent

la réplication et la différenciation cellulaire. Les rôles particuliers des différents éléments seront détaillés dans les chapitres qui suivent.

Tableau 1. Proportions relatives des éléments minéraux dans un organisme de mammifère.

Macroélément	g/kg	Oligoélément	mg/kg
Calcium	16	Fer	70
Phosphore	10	Zinc	30
Potassium	2,5	Manganèse	3
Soufre	2,0	Cuivre	2
Sodium	1,5	Iode	0,4
Chlore	1,0	Sélénium	0,2
Magnésium	0,5	Cobalt	0,02

La nutrition minérale et l'évolution des objectifs de l'élevage des ruminants

Les recherches en nutrition minérale des ruminants en France ont véritablement débuté à l'Inra de Jouy-en-Josas et à l'école vétérinaire de Maisons-Alfort à la fin des années 1950. Depuis, elles ont dû, comme les autres secteurs de l'alimentation, s'adapter aux objectifs successifs de l'élevage (figure 1).

Le premier objectif, qui demeure d'actualité, a été de considérer l'apport minéral alimentaire comme un facteur d'optimisation de la valorisation des rations et donc de la productivité des ruminants, qui a conduit à l'évaluation de leurs besoins alimentaires (Inra, 1978) et, un peu plus tard, à ceux des micro-organismes qu'ils hébergent dans leur tube digestif (Guéguen *et al.*, 1987). De nombreuses mises à jour ont été publiées depuis, tant en France (Inra, 1988, 2007, 2018 ; Meschy, 2002 ; Meschy et Corrias, 2005) qu'à l'étranger (AFRC, 1991, 1997 ; CSIRO, 1990 ; GfE, 2001, 2003 ; NRC, 1980, 2001, 2007 ; Sehested, 2004 ; Valk et Beynen, 2003).

L'étude du contenu minéral des fourrages et des aliments concentrés, menée en parallèle, a mis en évidence la nécessité de recourir à des compléments minéraux pour équilibrer les rations, incapables dans leur quasi-totalité de satisfaire l'ensemble des besoins des animaux. La qualité des sources inorganiques complémentaires, en particulier des phosphates, en raison de leur importance nutritionnelle et économique, a fait l'objet de recherches à partir du début des années 1960 (Guéguen, 1961) qui se sont développées dans les années 1970 (Guéguen, 1970) et sont toujours d'actualité.

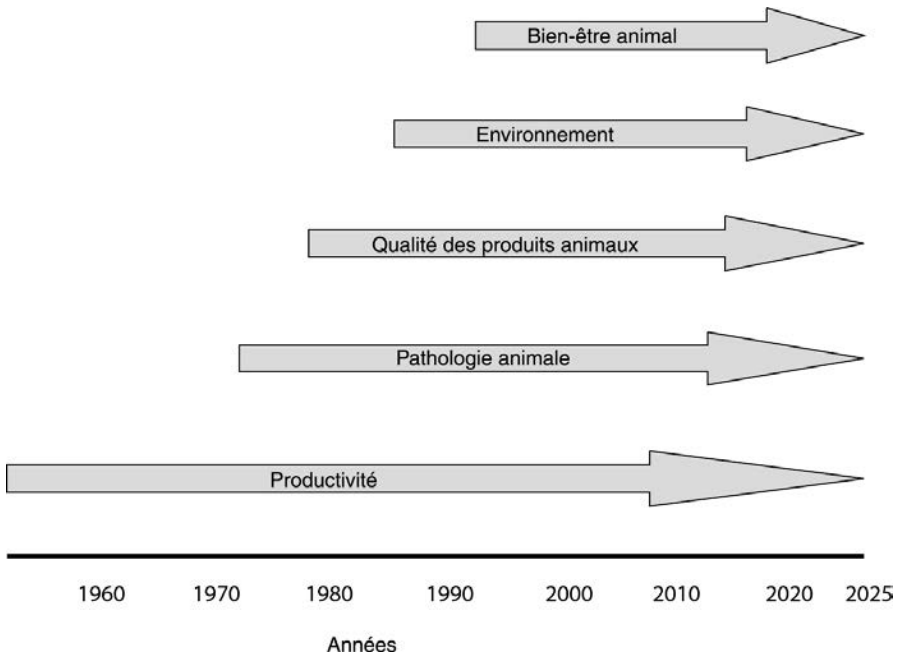


Figure 1. Évolution des objectifs de l'élevage.

L'augmentation de la productivité des animaux a eu pour corollaire l'accroissement de la fréquence des troubles métaboliques, notamment d'origine minérale ; des travaux ont été entrepris et se poursuivent pour l'étude des mécanismes et des moyens de prévention de l'acidose, des tétanies et de la fièvre vitulaire entre autres.

L'alimentation minérale des ruminants n'a que peu d'incidence sur la composition de leurs produits destinés à l'alimentation humaine ; cependant, la place essentielle des produits laitiers pour l'apport en calcium et la supériorité des produits carnés comparés aux végétaux en termes de disponibilité de certains oligoéléments (fer, cuivre et zinc) ont été clairement démontrées.

Vers le milieu des années 1980, l'émergence des préoccupations écologiques a souligné, souvent de manière très excessive, la responsabilité des activités agricoles dans la détérioration du milieu ambiant. L'élevage est montré du doigt pour l'émission des gaz à effet de serre et pour l'azote et le phosphore contenus dans les déjections animales. Seule sera abordée ici la relation entre rejets de phosphore et environnement. Il convient tout d'abord de nuancer les choses en rappelant qu'environ 60 % des rejets de phosphore sont d'origine domestique (principalement rejets physiologiques et utilisation de détergents), tandis que les activités agricoles au sens large en

représentent approximativement 20 %, et l'activité d'élevage vraisemblablement moins de 10 % (Meschy *et al.*, 2008). Il est vrai que les élevages de ruminants, de bovins en particulier, contribuent pour les 2/3 aux 300 000 tonnes de phosphore émises annuellement dans les déjections animales. Cette observation doit être relativisée car, d'une part, les rejets en phosphore contenus dans les effluents d'élevage sont valorisés par les productions végétales, fourragères ou non et, d'autre part, la densité des ruminants est relativement modeste à quelques exceptions près. La principale conséquence des rejets excessifs de phosphore dans l'environnement est l'eutrophisation des eaux de surface et littorales, conséquence d'un apport pléthorique de nutriments au milieu aquatique, notamment de nitrates et de phosphates — ces derniers constituant le facteur limitant au développement d'algues, de phytoplancton et éventuellement de végétaux aquatiques comme les lentilles d'eau (figure 2). L'apport de phosphates accélère le processus, le développement exagéré d'algues et de phytoplancton conduit à un appauvrissement en oxygène et à un accroissement du pouvoir réducteur du milieu. Ceci se traduit par la raréfaction puis la disparition de la vie aquatique aérobie (crustacés, poissons) et à la production de gaz délétères (thiols, méthane). Sans être un véritable problème de santé publique comme l'excès de nitrates dans l'eau pour les nourrissons par exemple (les phosphates ne contaminant pas les nappes phréatiques), l'eutrophisation est un facteur de dégradation de l'environnement pouvant compromettre les loisirs aquatiques dans certaines régions. La réduction de l'émission de phosphates dans les déjections animales requiert un bon ajustement des apports alimentaires de phosphore, notamment inorganique, aux besoins des animaux car toute distribution excédentaire vient augmenter, dans sa quasi-totalité, le flux polluant (Meschy *et al.*, 2008). L'utilisation de sources inorganiques complémentaires de haute valeur nutritionnelle est également un moyen efficace pour limiter le gaspillage de phosphore.

Les conditions alimentaires susceptibles d'induire des pathologies cliniques ou subcliniques altèrent, bien évidemment, le bien-être des animaux. Cependant, hors de ces situations, les effets directs de la nutrition minérale sur le bien-être et le comportement des ruminants n'ont suscité que peu d'études, dont les résultats sont en outre quelquefois contradictoires. Ainsi, le chrome, parfois considéré comme un facteur antistress, a fait l'objet d'un certain nombre de travaux, dont ceux de Sano *et al.* (2000) qui ont montré l'efficacité de la supplémentation de chrome lors du stress thermique, conséquence d'une meilleure utilisation du glucose, alors que Kegley *et al.* (1997) n'observent aucun effet lors du stress de transport. Des études complémentaires sont nécessaires dans ce domaine, émergent

il est vrai, recherches qui devront probablement être étendues à d'autres éléments comme le cuivre et le zinc. L'acidose latente ou aiguë, qui peut trouver son origine dans un dysfonctionnement du métabolisme minéral, a des répercussions notoires sur le comportement alimentaire (Desnoyers *et al.*, 2008) et pourrait altérer l'équilibre acido-basique métabolique (Giger-Reverdin *et al.*, 2014). En outre, les conséquences pathologiques de l'acidose chronique telles que la parakérose du rumen, les abcès hépatiques et la dermatite interdigitée (fourbure) sont source de douleur pour l'animal et altèrent vraisemblablement leur bien-être.

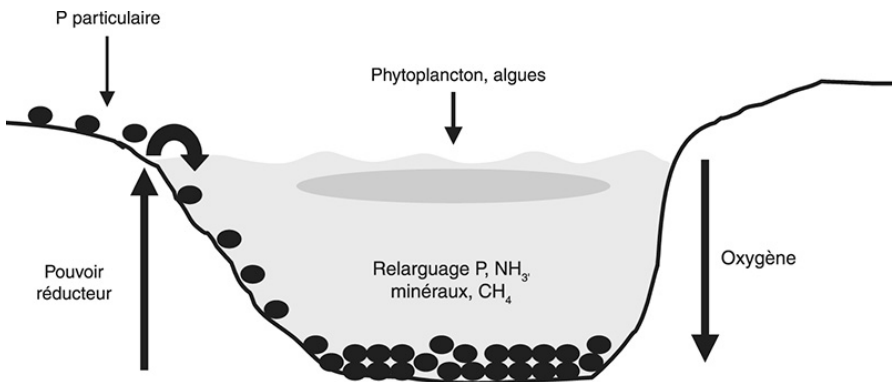


Figure 2. Eutrophisation des eaux de surface.

Le développement de systèmes de production biologiques pourrait avoir des répercussions sur l'approche de la nutrition minérale des ruminants. Pour des niveaux de production comparables, les besoins physiologiques demeurent les mêmes. En revanche, le choix des sources minérales complémentaires pourrait être modifié. Pour le phosphore, il n'existe pas véritablement de solution alternative tant que les phosphates d'origine animale (poudre et phosphate bicalcique d'os) demeurent interdits. En revanche, des apports plus naturels peuvent être envisagés pour Na (sel marin) et Ca (calcaires d'origine marine). L'hydroxyde de magnésium, parfois improprement appelé magnésie marine, semble intéressant mais son coût est prohibitif pour une utilisation en alimentation animale. Le cahier des charges de l'agriculture biologique proscrie l'emploi des sels organiques d'oligo-éléments (chélates, protéinates...), seules les sources classiques (sulfates et oxydes principalement) peuvent être utilisées.

L'aliment minéral

Pour les espèces monogastriques, dans la majorité des cas, à l'exception de l'aliment fermier en production porcine, l'équilibre minéral du régime est assuré au stade de la formulation de l'aliment complet par l'incorporation

d'un pré-mélange minéral (et vitaminique). L'éleveur de ruminants connaît une situation tout autre car il doit faire appel à un produit spécifique, l'aliment minéral, anciennement appelé « complément » ou « composé minéral vitaminisé » (CMV), et plus anciennement encore « condiment minéral ». L'aliment minéral (AM) qui est précisément défini au plan réglementaire est supposé corriger toutes les insuffisances minérales (et vitaminiques) d'une ration donnée. Il apparaît immédiatement qu'il ne peut y avoir d'AM universel, valable pour toutes les situations, le choix de l'éleveur devant reposer sur l'analyse de la ration qu'il distribue ; ce point sera développé dans le dernier chapitre. L'usage, sans aucune contrainte réglementaire, est de désigner l'AM par deux, parfois trois chiffres, le premier indiquant le pourcentage de phosphore, le deuxième celui de calcium et l'éventuel troisième la teneur en magnésium ; ainsi, 7-21 indique un AM contenant 7 % de phosphore et 21 % de calcium. Les gammes d'AM présentes sur le marché permettent de corriger efficacement les insuffisances minérales de la plupart des rations distribuées aux ruminants dans notre pays. Les aliments minéraux représentent un secteur non négligeable de l'industrie de l'alimentation du bétail : la production d'AM peut être estimée à environ 350 000 tonnes par an auxquelles il convient d'ajouter la fabrication de pierres et blocs à lécher, de l'ordre de 70 000 tonnes par an. Les aliments minéraux sont destinés à 85 % aux ruminants et à 15 % à la fabrication d'aliments fermiers en production porcine (Afca-Cial, 2015).

1

Les éléments minéraux dans l'écosystème ruminal

Tout comme pour les autres nutriments, la satisfaction des besoins en éléments minéraux des micropopulations du rumen constitue la première étape de l'alimentation rationnelle des ruminants ; cela est d'autant plus vrai que pour certains éléments (phosphore, soufre), ces besoins sont sensiblement supérieurs à ceux de l'animal-hôte. L'apport alimentaire doit donc optimiser les diverses fonctions microbiennes, notamment la croissance de la biomasse, les activités de dégradation des substrats, cellulolytique en particulier mais aussi permettre la synthèse des protéines microbiennes. Les éléments minéraux participent à deux objectifs distincts et complémentaires : le maintien des constantes physico-chimiques (équilibre acido-basique, pression osmotique et potentiel d'oxydoréduction) dans des zones de valeurs favorables à l'activité microbienne d'une part et, d'autre part la satisfaction des besoins minéraux propres des différentes micropopulations du rumen. Cependant, pour certains éléments, sodium et potassium en particulier, cette distinction n'est pas toujours simple à établir car ils sont impliqués dans l'une et l'autre de ces fonctions (Jouany *et al.* 1995).

Un bref rappel des méthodes d'étude les plus usuelles permet d'en préciser les intérêts et les limites.

Méthodes expérimentales

L'étude de l'impact des variations de l'apport minéral (ou de celles des concentrations dans le milieu) sur le métabolisme des micro-organismes du rumen se heurte à quelques problèmes méthodologiques du fait, entre autres, du caractère le plus souvent strictement anaérobie de la majorité des espèces microbiennes impliquées.

Dans ce domaine, les études *in vivo* sont de portée assez limitée car elles ne permettent pas de réaliser des bilans précis de l'activité microbienne indépendants de la physiologie de l'animal-hôte (ingestion, sécrétions digestives ou sanguines *vs* absorption et transit vers le compartiment digestif suivant). Ces méthodes sont à réserver à des études globales du type de réponses aux

variations quantitatives ou qualitatives de l'apport alimentaire des paramètres de l'écosystème ruminal comme le pH, le profil en acides gras volatils (AGV), la concentration en azote ammoniacal (N-NH₃), etc. Elles ont été largement utilisées, par exemple, dans les essais portant sur l'addition de substances tampon à la ration. La grande majorité des informations concernant l'impact des éléments minéraux sur le métabolisme des micropopulations du rumen a été obtenue *in vitro*.

Les méthodes de culture *in vitro* peuvent se répartir en trois principales catégories :

- les cultures pures concernent une seule espèce microbienne. Issues des méthodes de microbiologie, elles livrent des informations intéressantes sur le métabolisme et les besoins de l'espèce étudiée, mais sont d'une portée pratique limitée en raison de la diversité des substrats fermentés et des produits finaux de la fermentation par l'ensemble des micropopulations du rumen ;
- les cocultures réalisées avec un mélange contrôlé de populations microbiennes suscitent les mêmes critiques ;
- les incubations conduites avec les micropopulations totales du rumen (phase liquide et extraction par filtration des bactéries associées à la phase solide) présentent l'avantage de mieux refléter l'activité de l'ensemble de la flore et de la faune ruminale, même si l'équilibre de ces populations peut être assez rapidement modifié par les conditions d'incubation.

Les techniques de culture *in vitro* des micro-organismes du rumen ont été développées il y a plus d'un demi-siècle (Hungate, 1947). Le dispositif idéal — qui n'est pas encore disponible — devrait prévoir des conditions simultanées de température, d'anaérobiose, d'apport de substrat dans le milieu comparables à la cinétique d'ingestion et d'évacuation des produits de la fermentation. Les systèmes fermés, de type *batch*, sont basés sur l'apport simultané de substrat et d'inoculum (ou de solution tampon) dans des conditions de température et d'anaérobiose contrôlées. Ils ont été largement utilisés, notamment en culture pure ou en coculture. Leur inconvénient principal est de ne permettre que des observations en temps court en raison de l'accumulation dans le milieu de produits de la fermentation conduisant après une dizaine d'heures à des déviations de la composition des populations microbiennes, voire à leur auto-intoxication.

Les fermenteurs constituent indéniablement une amélioration, dans la mesure où ils permettent l'étude de l'activité microbienne sur des temps plus longs (plusieurs semaines). Leur principe est de simuler les différents compartiments du rumen : alimentation, phase solide, phase liquide et évacuation des produits terminaux de la fermentation. Ces dispositifs