4. Minéraux et vitamines

Patrick Schlegel

Version 06/2021, basée sur la version de 1999 rédigée par Jürg Kessler

Table des matières

4.1. Minéraux 2
4.1.1. Régulation physiologique 2
4.1.2. Besoin minéral des microorganismes de la panse 2
4.1.3. Besoins en macro-éléments 3
4.1.4. Besoins en oligo-éléments 6
4.1.5. Transfert minéral dans les produits 7
4.1.6. Sources minérales supplémentées 7
4.1.7. Indicateurs du statut nutritionnel 9
4.1.8. Carences minérales cliniques 11
4.1.9. Seuils de tolérance 12

4.2. Vitamines 13

4.3. Bibliographie 14

Annexes 17

Agroscope une bonne alimentation, un environnement sain

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie,
de la formation et de la recherche DEFR
Agroscope

4.1. Minéraux

Les minéraux sont définis par les éléments restants après calcination de matériaux d'origine animale et végétale (cendres). En fonction de la teneur minérale corporelle, ils sont divisés en macro-éléments (plus de 50 mg/kg de poids vif) et en oligo-éléments (moins de 50 mg/kg). Leur répartition corporelle est inégale, car ~83 % se situe dans l'os, ~10 % dans le muscle et ~7 % dans le reste du corps. Une vache laitière pesant 650 kg contient ~22 kg de minéraux, dont 16 kg de calcium et de phosphore. Les minéraux remplissent des fonctions très variées. En particulier, ils sont constituants d'organes, de tissus et d'enzymes, ils participent à la régulation et au maintien de l'équilibre acido-basique des liquides corporels, comme le sang et la salive, et ils sont des activateurs d'enzymes et d'hormones. Les minéraux essentiels pour le ruminant, ayant une importance pratique, sont rapportés dans le tableau 4.1. Un élément minéral est considéré comme essentiel si son appauvrissement (déplétion) dans le corps provoque des troubles métaboliques qui ne peuvent être évités ou supprimés que par un apport complémentaire de cet élément.

Tableau 4.1 Minéraux essentiels qui ont une importance pratique dans l'alimentation du ruminant

Macro-éléments				Oligo-éléments			
Calcium	Ca	Sodium	Na	Cuivre	Cu	Molybdène	Mo
Phosphore	P	Chlore	CI	Fer	Fe	Cobalt	Co
Magnésium	Mg	Soufre	S	Manganèse	Mn	Iode	I
Potassium	K			Zinc	Zn	Sélénium	Se

4.1.1. Régulation physiologique

L'animal peut tolérer des écarts entre la quantité minérale ingérée et celle nécessaire pour couvrir les besoins. En fonction de la grandeur de l'écart et de sa durée, des adaptations physiologiques s'opèrent progressivement, tel que la résorption / la formation de réserves (principalement Ca, P et Zn du squelette; Cu, Mn et Se du foie), la modulation de l'absorption digestive active (Ca, P, Mg), l'adaptation de la réabsorption rénale (Ca, P, Mg, K, Na, Cl, I), des sécrétions intestinales (Cu, Mn, Zn, Se) et, pour certains, l'excrétion via le lait (Se et I). Cette capacité de régulation physiologique dépend de l'élément, la durée et de l'amplitude de l'écart. Lorsque la régulation physiologique ne permet plus de combler l'écart entre apport et besoin, les premiers symptômes physiologiques de carence ou de toxicité peuvent être détectés. Les symptômes de carence ou de toxicité cliniques (visuels) apparaissent lorsque ce type de situation est prolongé dans le temps.

4.1.2. Besoin minéral des microorganismes de la panse

Les minéraux sont essentiels aux microorganismes (bactéries, protozoaires, champignons) vivant dans la panse. L'apport alimentaire minéral doit donc non seulement couvrir le besoin de l'animal, mais aussi garantir un apport suffisant sous forme soluble (en milieu aqueux) pour couvrir le besoin des microorganismes de la panse. Pour certains éléments, tel que Co et S, l'activité optimale des microorganismes est le facteur limitant tandis que pour d'autres éléments, le besoin des microorganismes est en général couvert par celui de l'animal. A titre d'exemple, l'apport en Mg nécessaire pour obtenir développement optimal des microorganismes se situe vers 1.5 g/kg matière organique digestible (Durand et Komisarczuk, 1988) soit un apport d'environ 1.0 g/kg MS qui est largement couvert par l'apport recommandé à l'animal. Si l'apport en Mg supplémenté est proportionnellement élevé, sa bonne solubilité en milieu aqueux doit être suffisante pour être à la fois disponible pour les microorganismes et pour être absorbable à travers la paroi de la panse. Le besoin en **phosphore** des microorganismes peut représenter plus du double du besoin d'entretien de l'animal. Pour le couvrir, le ruminant recycle, via la salive, une quantité importante de l'élément (équivalent à environ 7.5 g P/kg MS ingérée chez la vache laitière en lactation). Le P salivaire, sous forme de phosphate solubilisé, est rapidement disponible pour les microorganismes. Un apport en P insuffisant aux microorganismes de la panse affecte, en premier lieu, les bactéries cellulolytiques ce qui provoque une baisse de la dégradation des fibres alimentaires et entraine une baisse de l'ingestion de l'animal. Avec des rations permettant une rumination adéquate, le besoin en P des microorganismes est susceptible d'être couvert par le recyclage salivaire du P. Toutefois, une carence en P des microorganismes peut être provoquée par des rations induisant des perturbations de la rumination (p. ex. acidose ruminale), malgré un apport alimentaire en P suffisant pour l'hôte. Ce type de ration (p. ex. rations à base d'ensilage de maïs plante entière) peut contenir une part importante du P alimentaire sous forme de phosphate, qui nécessite une bonne solubilité dans la panse (donc dans l'eau) pour apporter en premier lieu du P aux microorganismes.

Les microorganismes de la panse possèdent la particularité de pouvoir synthétiser des acides aminés à partir d'azote non protéique. Une présence insuffisante en **soufre** peut constituer un facteur limitant à ces synthèses. Le besoin en S des micro-organismes est estimé entre 2.5 et 3.1 g/kg matière organique digestible (Durand et Komisarczuk, 1988), ce qui représente un apport d'environ 2 g/kg MS. Lorsque l'apport protéique est en partie effectué à l'aide d'urée, l'apport en S est réduit. De ce fait, il faut ajouter 30 - 40 g S /kg d'urée supplémentée.

Les bactéries de la panse peuvent synthétiser la vitamine B_{12} à partir du **cobalt** alimentaire. Sur le principe, cette synthèse est optimale avec un apport alimentaire de 0.10 à 0.15 mg Co /kg MS. Le Co favorise aussi l'attachement des bactéries cellulolytiques à leur substrat et la dégradation de ce dernier (Lopez-Guiza et Satter, 1992). Toutefois, l'apport de 0.30 mg Co /kg MS n'a pas amélioré la digestibilité de la cellulose, de la paroi cellulaire, ni de la lignocellulose comparé à 0.10 mg Co /kg MS (Kessler et Arrigo, 1996). Avec des rations pauvres en fibres, tel que celles riche en ensilage de maïs, l'apport en Co nécessaire pour obtenir une performance zootechnique et une teneur sanguine en vitamine B_{12} maximale, est plus élevé pour se situer entre 0.15 - 0.20 mg Co /kg MS (Schwarz et al., 2000; Stangl et al., 2000).

4.1.3. Besoins en macro-éléments

Les besoins en macro-éléments (excepté S) sont estimés au moyen de la méthode factorielle qui consiste à additionner les flux sortants et retenus, pour chaque élément séparément. Les **besoins nets ou absorbés en macro-éléments** (tableau 4.2.) sont la somme des:

Besoins d'entretien = Pertes fécales endogènes et urinaires inévitables. Les pertes via la sueur sont prises en compte pour K et Na.

Besoins de production
= Croissance: éléments retenus lors de la croissance
= Gestation: éléments retenus par l'utérus et le fœtus
= Production laitière: éléments excrétés par le lait

Tableau 4.2. Besoin net d'entretien et de production en macro-éléments chez le bovin, ovin et caprin

			Ca	P	Mg	K [6]	Na [6]	Cl
Bovin								
Entretien[1]	Croissance	[g/j]	0.90 * MSI	0.90 * MSI	0.22 * MSI	0.10 * PV	0.015 * PV	0.023 * PV
	Tarissement, sans croissance	[g/j]	0.85 * MSI	0.90 * MSI	0.22 * MSI	0.10 * PV	0.015 * PV	0.023 * PV
	Lactation	[g/j]	0.90 * MSI	0.90 * MSI	0.22 * MSI	0.15 * PV	0.023 * PV	0.035 * PV
Croissance[2]	<200 kg PV	[g/kg GMQ]	15.0	7.5	0.40	1.60	1.40	1.00
	>200 kg PV; <500 kg PV_{Adulte}	[g/kg GMQ]	11.0	6.0	0.40	1.60	1.40	1.00
	>200 kg PV; >500 kg PV_{Adulte}	[g/kg GMQ]	12.0	6.7	0.40	1.60	1.40	1.00
Tarissement[3]	8 à 3 semaines avant mise-bas	[g/j]	6.5	4.5	0.15	1.00	1.20	1.00
	dès 3 semaines avant mise-bas	[g/j]	9.0	5.2	0.30	1.00	1.20	1.00
Production laitière[4]		[g/kg lait/j]	1.22	1.00	0.10	1.55	0.40	1.15
Caprin								
Entretien[1]	Croissance	[g/j]	0.90 * MSI	1.10 * MSI	0.25 * MSI	0.10 * PV	0.015 * PV	0.023 * PV
	Tarissement, sans croissance	[g/j]	0.85 * MSI	1.10 * MSI	0.25 * MSI	0.10 * PV	0.015 * PV	0.023 * PV
	Lactation	[g/j]	0.90 * MSI	1.10 * MSI	0.25 * MSI	0.15 * PV	0.023 * PV	0.035 * PV
Croissance[2]	<50 kg PV	[g/kg GMQ]	9.5	5.5	0.40	2.00	1.20	1.00
	>50 kg PV	[g/kg GMQ]	7.5	4.5	0.40	2.00	1.20	1.00
Tarissement[5]		[g/fœtus/j]	1.0	0.6	0.03	0.25	0.15	0.40
Production laitière[4]		[g/kg lait/j]	1.20	0.90	0.10	2.00	0.35	1.30
Ovin								
Entretien[1]	Croissance	[g/j]	0.90 * MSI	1.10 * MSI	0.25 * MSI	0.10 * PV	0.015 * PV	0.023 * PV
	Tarissement, sans croissance	[g/j]	0.85 * MSI	1.10 * MSI	0.25 * MSI	0.10 * PV	0.015 * PV	0.023 * PV
	Lactation	[g/j]	0.90 * MSI	1.10 * MSI	0.25 * MSI	0.15 * PV	0.023 * PV	0.035 * PV
Croissance[2]	<30 kg PV	[g/kg GMQ]	9.5	5.5	0.40	1.80	0.90	0.70
	>30 kg PV	[g/kg GMQ]	7.5	4.5	0.40	1.80	0.90	0.70
Tarissement[5]		[g/fœtus/j]	0.7	0.4	0.03	0.25	0.15	0.40
Production laitière[4]		[g/kg lait/j]	1.90	1.50	0.18	1.30	0.45	1.15

Abbréviations: PV: poids vif; GMQ: Gain moyen quotidien; MSI: Matière sèche ingérée

[1] Meschy, 2010; NRC, 2001; GfE, 2001

[2] AFRC, 1991

[3] House et Bell, 1993; Meschy, 2010

[4] Sieber, 2011

[5] Meschy, 2010

[6] Dès >30 °C, le besoin d'entretien en K et Na augmente de respectivement 0.004 et 0.005 g/kg PV /j par les pertes de transpiration (NRC, 2001)

Les besoins d'entretien en Ca et P sont exprimés en fonction de l'ingestion et ceux des électrolytes K et Na en fonction du poids de l'animal. Pour une harmonisation avec Ca et P, le besoin d'entretien en Mg, initialement basé sur le poids de l'animal, est adapté en fonction de l'ingestion, comme dans les recommandations allemandes (GfE, 2001). Les besoins d'entretien en Ca, K, Na et Cl dépendent de l'intensité du métabolisme (croissance et lactation vs. entretien et gestation). Le besoin d'entretien en Mg, inclue la perte en Mg urinaire inévitable (Meschy et Corrias, 2005) qui jusqu'à présent était considérée comme négligeable (NRC, 2001). Les pertes minérales dues à la transpiration peuvent être prises en considération pour K et Na. Certaines formules originales ont été simplifiées dans cet ouvrage.

Le **coefficient d'absorption** est nécessaire pour la détermination des **besoins bruts** dans le cadre de la méthode factorielle, c'est-à-dire la quantité d'éléments majeurs à apporter au ruminant.

Besoin brut = besoin net / coefficient d'absorption.

Dans l'estimation du besoin par la méthode factorielle, l'influence du coefficient d'absorption défini est majeure. Le coefficient d'absorption de l'élément peut varier en fonction de la source de l'élément, de l'influence d'autres éléments nutritifs, de l'espèce, de la race, du poids de l'animal ou encore du stade physiologique de l'animal. Cela peut engendrer des plages de coefficients assez large (Annexe 1). Les coefficients d'absorption définis (Tableau 4.3) sont déclinés par espèce et varient directement, si estimé nécessaire, en fonction de la composition de la ration.

Tableau 4.3. Coefficient d'absorption [%] du Ca, P, Mg, K, Na et Cl

	Ca	P	Mg	K	Na	Cl
Bovin						
Pré-ruminant	70	80	40	90	90	90
Ruminant	35 - 45[2)]	70	28 - 90*K/CB[1)]	90	90	90
Caprin						
Pré-ruminant	70	80	40	90	90	90
Ruminant	35 - 45[2)]	70	28 - 0.5*K[1)]	90	90	90
Ovin						
Pré-ruminant	70	80	70	90	90	90
Ruminant	35 - 45[2)]	70	46 - 0.4*K[1)]	90	90	90

[1)] K et CB (cellulose brute) en g/kg MS

[2)] En fonction de la composition de la ration:

Part en aliments complémentaires	< 10%	10% - 25%	> 25%
Ration mixte de produits laitiers - fourrage	65%	65%	65%
Ration à base d'ensilage maïs (>40%)	42%	44%	46%
Ration à base d'ensilage maïs (<40%)	40%	42%	44%
Ration herbagère [3)]	38%	39%	41%
Ration herbagère, 10% pulpes de betterave	35%	37%	39%

[3)] Une forte présence de légumineuses (type L), les coefficients sont réduits de 5%

- **Calcium:** L'absorbabilité dépend de la composition de la ration. Il n'y a pas d'indications quantifiables permettant de distinguer le coefficient selon l'espèce animale (bovin, ovin, caprin), le poids ou le stade physiologique. L'absorption du Ca est peu sensible à l'antagonisme d'autres nutriments. Les coefficients les plus détaillés ont été adoptés par l'Institut National de Recherche Agronomique français (INRA, 2007) qui sont déclinés par aliment. Le Nutrient Research Council américain (NRC, 2001) propose des coefficients en fonction de groupes d'aliments (fourrage à 30 %, aliments complémentaires à 60 %, aliments minéraux à 70 %). Les recommandations allemandes (GfE, 2001), scandinaves (NorFor, 2001) et hollandaises (CVB, 2005) proposent un coefficient unique de respectivement 50, 50 et 68 %. A l'aide des coefficients d'absorption réels des composantes (Meschy et Corrias, 2005), le coefficient de rations types pour vaches laitières se situe entre 35 et 45 % en fonction du type de ration et de la part en aliment complémentaire (Annexe 2).
  Ainsi, Agroscope adopte plusieurs coefficients d'absorption de Ca chez le ruminant en fonction du type de ration. Chez le pré-ruminant, Agroscope adopte un seul coefficient d'absorption de Ca (Yuangklang et al., 2010) correspondant à une ration comprenant des produits laitiers et une part de fourrage.

- **Phosphore:** L'absorbabilité dépend de la composition de la ration. Il n'y a pas d'indications quantifiables permettant de distinguer le coefficient selon l'espèce animale (bovin, ovin, caprin), le poids ou le stade physiologique. L'absorption du P est peu sensible à l'antagonisme d'autres nutriments. Toutefois, un apport excessif en aluminium ou en Fe (Rosa et al. 1982) indique une possible dégradation de l'utilisation du P, sans

pour autant être quantifiable. Le Ca peut seulement détériorer le coefficient du P si l'un des deux éléments ne couvre pas le besoin de l'animal. Les coefficients les plus détaillés ont été adoptés par l'Institut National de Recherche Agronomique français (INRA, 2007) qui sont déclinés par aliment. Le Nutrient Research Council (NRC, 2001) propose des coefficients en fonction de groupes d'aliments (fourrage à 64 %, aliments complémentaire à 70 %, aliments minéraux à 90 %), Les recommandations allemandes (GfE, 2001), scandinaves (NorFor, 2001) et hollandaises (CVB, 2005) proposent un coefficient unique de respectivement 70, 70 et 75 %. A l'aide des coefficients d'absorption réels des composantes (Meschy, 2002, Jongbloed et al., 2002, Annexe 3), le coefficient de rations types pour vaches laitières en lactation s'est révélé peu variable (selon les rations entre 70 et 78%, Annexe 4). Cette variabilité était moins importante que celle des coefficients de chaque composante (Meschy, 2002).
Ainsi, Agroscope adopte un coefficient d'absorption du P unique pour respectivement, le pré-ruminant et le ruminant (Schlegel, 2012). Le coefficient d'absorption défini pour le pré-ruminant correspond à une ration comprenant en partie du fourrage (Yuangklang et al., 2010).

- **Rapport entre calcium et phosphore:** L'absorption et le métabolisme du P sont étroitement liés à ceux du Ca et de la vitamine D3. Une présence excessive d'ions Ca dans le tractus digestif par rapport à la présence d'ions P peut réduire l'absorbabilité du P par la formation de complexes phosphocalciques. A l'inverse, un apport insuffisant en Ca conduit à une résorption des réserves osseuses en Ca. Elle libère aussi du P osseux dans le flux sanguin qui est ensuite déversé, via la salive, dans la panse.
  Le recyclage salivaire du P, quantitativement si important, induit un rapport Ca : P au niveau intestinal, plus du tout en relation avec celui de la ration. Par conséquent, le rapport Ca : P de la ration n'est pas important, lorsque les deux éléments couvrent les besoins de l'animal. Néanmoins, le choix d'un aliment minéral complémentaire en fonction de son rapport Ca : P n'est pas remis en cause.

- **Magnésium:** Le Mg est absorbé dans l'intestin du pré-ruminant et principalement à travers la paroi ruminale du ruminant. L'absorbabilité peut être influencé par de nombreuses raisons, mais les connaissances actuelles, permettent de quantifier quatre facteurs d'influence:
  1) La capacité d'absorption en Mg des ovins est supérieure à celle des bovins et des caprins (Adediji et Suttle, 1999; Kessler, 2000a; Meschy et Corrias, 2005).
  2) La présence accrue de K alimentaire, réduit de manière linéaire l'absorption du Mg à travers la paroi ruminale (Weiss, 2004; Schonewille et al., 2008). Cet antagonisme est plus prononcé chez le bovin et le caprin que chez l'ovin (Meschy et Corrias, 2005).
  3) Une baisse de la teneur en cellulose alimentaire réduit l'absorbabilité du Mg provoqué par une modification du volume et transit ruminal chez la vache laitière (Oberson et al., 2019).
  4) Une ration déséquilibrée en Na (carencée) ou en Ca (excessif, au moins 2 fois l'apport en Ca recommandé) réduit l'absorbabilité et le statut en Mg (Kronqvist et al., 2011).
  Par contre, un excédent récurant en protéine n'a pas modifié l'absorption magnésique (Oberson et al., 2019).

  Ainsi, Agroscope adopte un coefficient d'absorption du Mg unique pour le pré-ruminant, une régression linéaire en fonction du K alimentaire chez les ovins et les caprins et une régression linéaire en fonction du K et de la cellulose brute alimentaire chez les bovins. Le coefficient d'absorption défini pour le pré-ruminant correspond à une ration comprenant en partie du fourrage (Yuangklang et al., 2010). Des régressions estimant le coefficient d'absorption apparent Mg en fonction du K alimentaire ont été proposées chez la vache laitière (Adediji et Suttle, 1999; Weiss, 2004; Schonewille et al., 2008 ; Meschy et Corrias, 2005). Le choix de la régression la plus appropriée a été effectué à l'aide de deux expériences sur vaches laitières menées par Agroscope. L'une (Kessler, 2000a) comparant l'absorbabilité apparente du Mg en fonction d'une ration à base de foin contenant soit 30 ou 40 g K /kg MS, l'autre (Schlegel et al., 2015) comparant le statut en Mg en fonction de l'apport alimentaire en Mg (2.0, 2.7 et 3.4 g Mg /kg MS) et le type de ration (ensilage herbe/maïs, regain ou pâture intégrale). Au final, l'expérience d'Oberson et al. (2019) a complété la régression par la prise en compte de l'effet de la cellulose.

- **Potassium, sodium et chlore**: L'absorbabilité des électrolytes K, Na et Cl est très élevée. Celle du Na n'est pas détériorée par un apport croissant en K alimentaire élevé, tant que l'apport en Na est conforme aux recommandations d'apport (Kessler, 2000b).

Le besoin en S de l'animal se base sur celui de la flore microbienne ruminale. Le besoin brut en soufre est estimé à 2.0 g/kg MS chez le bovin et l'ovin. Chez le caprin, le besoin brut en S est estimé à 2.2 g/kg MS.

Les apports recommandés en macro-éléments sont indiqués dans les chapitres respectifs de chaque catégorie animale (veau d'élevage; génisse d'élevage; vache laitière; vache allaitante; veau à l'engrais; bovin à l'engrais; mouton; chèvre).

4.1.4. Besoins en oligo-éléments

Les besoins en oligo-éléments sont déclinés par la méthode empirique qui consiste à déterminer par un apport croissant de l'élément, la quantité nécessaire pour atteindre un niveau maximal (plateau) d'un paramètre répondant spécifiquement à son apport. Les teneurs osseuses et sanguines ou l'activité enzymatique sanguine sont les paramètres les plus usuels. L'approche factorielle a été utilisée dans la dernière révision américaine (NRC, 2001), mais le point sensible réside dans la définition du coefficient d'absorption. Ce dernier est basé sur peu de données et évolue en fonction de la teneur alimentaire de l'élément et du statut minéral de l'animal.
Par la présence carencée ou excessive d'un autre élément, la biodisponibilité de l'oligo-élément étudié peut être affectée. La **biodisponibilité** correspond au degré d'utilisation maximal d'un élément ingéré pouvant être utilisé par un animal sain pour une fonction biochimique ou physiologique ou pour les réserves. Elle comprend son absorbabilité et les possibles interactions minérales pouvant influencer l'absorption ou l'excrétion endogène de l'élément.
Comme les avantages potentiels de la méthode factorielle semblent pouvoir être mise difficilement à profit sous les conditions de production helvétiques, Agroscope maintient les recommandations d'apports en oligo-éléments sur la méthode empirique et les corrige en fonction des interactions minérales. Les interactions minérales sont toutefois peu quantifiées. Celles qui représentent un intérêt chez les ruminants sont décrites ci-dessous.

- **Interaction molybdène-soufre-cuivre:** Dans la panse, la présence de Mo et de S forme des thiomolybdates se liant au Cu présent. La présence accrue en thiomolybdates de Cu réduit progressivement l'absorbabilité du Cu (Suttle and Mc Lauchlan, 1976; Suttle, 1983, Annexe 5). Avec un apport alimentaire de 10 mg Cu /kg MS, un statut en Cu plasmatique marginal est atteint lorsque les teneurs alimentaires en Mo et S sont supérieures à respectivement 2.0 et 3.0 g/kg MS (Dias et al. 2013, Annexe 5). Un fourrage riche en Mo peut se trouver dans les endroits marécageux et tourbeux.

- **Interaction fer-cuivre et fer-zinc:** Lorsque le fourrage est fortement souillé par de la terre, la teneur en Fe augmente. Une teneur alimentaire en Fe élevée et solubilisée dans le tube digestif peut engendrer une diminution de l'absorbabilité du Cu et du Zn alimentaire, augmentant ainsi leurs besoins bruts. Le Fe provenant de contaminations serait peu soluble tel quel, mais après fermentation (ensilage d'herbe) le Fe pourrait se trouver sous forme soluble (Hansen et Spears, 2009). La solubilisation de Fe provenant de la terre est donc plus probable dans les fourrages ensilés.

- **Interaction potassium-manganèse, soufre-manganèse et fer-manganèse:** L'excès de ces éléments pourrait perturber le métabolisme du Mn, probablement par une absorption réduite. L'absorbabilité du Mn étant très faible, ces antagonismes peuvent fortement influencer le besoin brut. Comme l'herbage suisse est souvent riche en K, les apports recommandés en Mn contiennent une marge de sécurité suffisamment élevée pour couvrir ces possibles interactions, car ils sont 2 à 4 fois supérieurs à ceux estimés à l'aide de la méthode factorielle (NRC, 2001).

- **Interaction sélénium-vitamine E :** Le Se et la vitamine E sont complémentaires dans leurs rôles d'antioxydants pour assurer le maintien de l'intégrité des membranes cellulaires. Ils ne sont toutefois pas totalement substituables l'un à l'autre. En raison de cette étroite relation, leurs effets ne peuvent que rarement être dissociés dans la pratique.

- **Interaction soufre-sélénium:** Ces deux éléments sont très proche chimiquement. L'absorption peut s'abaisser dès que la teneur en S alimentaire excède 2.5 g/kg MS (Pope et al.1979), toutefois une influence négative sur le statut sélénique reste controversée.

- **Interaction iode-sélénium:** La transformation de l'hormone T_4 en T_3 dans la thyroïde est catalysée par l'action de désiodases qui sont sélénodépendantes. Ainsi, une carence en Se peut perturber cette transformation et peut engendrer un dysfonctionnement thyroïdien.

- **Interaction de substance goitrogènes-iode**: La présence de substances goitrogènes dans la ration limite le transfert d'I à la glande thyroïdienne et aux glandes mammaires, mais augmente le taux sanguin et son excrétion urinaire (Franke et al., 2009a ; Franke et al., 2009b). Lorsque la ration est composée à part importante (20 % - 25 %) d'aliments contenant des glucosinolates (crucifères dont le chou moellier, les navets et le colza non-00) ou de des glucosides cyanogéniques (graines de lin, trèfle blanc, millet), il est recommandé d'augmenter l'apport en I alimentaire pour assurer le besoin en I de l'animal. Une teneur élevée en nitrates, tel que surtout présent dans l'herbage d'automne et certaines cultures dérobées, est également suspectée d'un effet antagoniste. Ceci, car les teneurs en I du lait sont les plus faibles en automne (van der Reijden et al., 2018 ; Walther et al., 2018).

Les apports recommandés en oligo-éléments sont indiqués dans les chapitres respectifs de chaque catégorie animale (veau d'élevage; génisse d'élevage; vache laitière; vache allaitante; veau à l'engrais; bovin à l'engrais; mouton; chèvre).

Remarques :

- Il est à préciser que ces apports recommandés se rapportent à la teneur totale dans la ration complète et non aux teneurs supplémentées dans la ration complète. Ces recommandations d'apport sont largement en dessous des apports maximaux autorisés (législation Suisse, Ordonnance sur le Livre des aliments pour animaux, Annexe 2). Les apports recommandés peuvent toutefois se rapprocher fortement des apports maximaux autorisés par certains labels. Ceci surtout, lorsque les teneurs naturelles de la ration sont faibles, comme pour Co, I ou Se.
- Si, les recommandations d'apport en oligo-éléments ne sont pas ou plus compatibles avec la loi ou des règlements de labels spécifiques, ces derniers priment sur les recommandations d'apport.

4.1.5. Transfert minéral dans les produits

Dans la majorité des cas, les teneurs minérales des produits (lait et viande) restent indépendantes de l'apport alimentaire de l'animal, à l'exception de certains organes, tel que le foie. L'exception à cette règle sont l'I, le Se et le Co. En fonction de leur apport alimentaire, leur teneur peut être modulée dans les produits et être adaptée en fonction du besoin en alimentation humaine. La teneur en Se du lait et de la viande peut être augmentée par la supplémentation de produits contenant de la sélénométhionine et/ou de la sélénocystéine. La teneur en I du lait est directement liée à la teneur en I de la ration (van der Reijden et al., 2019). Pour prévenir des carences en iode de la population suisse, les recommandations d'apport en iode chez la vache en lactation peuvent être adaptées pour obtenir une teneur en iode désirée dans le lait. Cette recommandation peut être plus élevée que le besoin propre de l'animal. De plus amples informations sur le sujet sont disponible dans un Agroscope Transfer (Schlegel et al., 2021).

4.1.6. Sources minérales supplémentées

Les critères de choix d'une source minérale supplémentée sont nombreux et sont, entre autre, les suivantes :

- Dispositions légales et teneurs indésirables (p. ex. métaux lourds)
- Caractéristiques physiques (granulométrie, pulvérulence, fluidité, risque de mottage, etc.) et chimiques (forme chimique, teneur minérale, pouvoir tampon du pH, etc.)
- Solubilité et cinétique de solubilité dans un pH neutre (eau) et acide.
- Efficacité sur l'animal
- Palatabilité (goût, arôme, texture)
- Prix par unité d'élément totale ou absorbable

Le coefficient d'absorption des macro-éléments de sources supplémentées figure dans le tableau 4.4. Celui des sources calciques varie fortement. Un apport classique de carbonate de Ca et de phosphate calcique résulte à un coefficient d'absorption moyen de 40 % pour le Ca. Le coefficient d'absorption du P est comparable entre les sources phosphatées et est en moyenne de 70 % comparable avec les autres composantes d'une ration. Le coefficient d'absorption du Mg des sources supplémentées varie également, mais est à relativiser. En effet, les rations expérimentales utilisées pour leur détermination étaient pauvres en K. Avec des rations riches en K, tels que rencontrées généralement en Suisse, les coefficients et les différences entre sources seraient ainsi fortement réduites.

Tableau 4.4. Coefficient d'absorption de macro-éléments de sources supplémentées chez le ruminant

Elément	Source	Coefficient d'absorption			
		Ca	P	Mg[1)]	Na, Cl
Ca	Carbonate de Ca	40			
Ca	Calcaire dolomitique	35			
Ca, P	Phosphate monocalcique	55	70		
Ca, P	Phosphate bicalcique	45	68		
P	Phosphate monosodique		75		
Mg	Sulfate de Mg			45	
Mg	Oxyde de Mg (<500 µm)			40	
Mg	Oxyde de Mg (>500 µm)			30	
Mg	Chlorure de Mg			40	
Ca, Mg	Dolomite	30		20	
Ca, P, Mg	Triple phosphate		70	45	
Na, Cl	Sel et autres				90
Incertitude moyenne		*±3*	*±4*	*±5*	

[1)] Rations exemptes de potassium excédentaire

Source: Revue de littérature par Jongbloed et al., 2002

Les sources d'oligo-éléments peuvent être groupées en deux catégories : Les sources sous forme inorganiques (oxyde, acétate, carbonate, chlorure ou sulfate) et les sources sous forme organique dans lesquelles l'élément est lié à un composé protéique (acide aminé, peptide ou protéine) ou spécialement dans le cas du Se, incorporé dans un acide aminé soufré en remplacement du S (sélénométhionine, sélénocystéine). La production de sources sous forme organique est ainsi nettement plus énergivore que celle des sources inorganiques. Historiquement, les premières sources sous forme organique étaient développées dans les années '70 pour proposer des acides aminés à effet by-pass ruminal (zinc méthionine) et seulement par la suite, ces sources ont été proposées pour améliorer la biodisponibilité de l'élément minéral en comparaison des sources inorganiques.
La biodisponibilité des sources inorganiques est dépendante, entre autre, de leur solubilité sous les différentes conditions gastro-intestinales. Les études comparant la biodisponibilité de sources inorganiques indiquent que la biodisponibilité du:

- Co: sulfate = carbonate > oxide
- Cu: sulfate = carbonate > oxide
- I: iodure de potassium = iodate de calcium
- Se: sélénite de sodium = sélénate de sodium
- Zn: sulfate = oxide

De nombreuses études ont été menées sur les sources organiques, mais un nombre limité d'entre elles permet une comparaison directe de la biodisponibilité avec une source inorganique. Dans le cas des cations (Cu, Fe, Mn et Zn), la liaison organique permettrait une meilleure protection de l'élément des interactions antagonistes dans le tractus digestif. Ainsi, la source organique arriverait intacte au site d'absorption. Les résultats sont toutefois contradictoires et ne permettent pas de confirmer que, globalement, la biodisponibilité des sources organique est supérieure à celle des sources inorganiques. Cela dépend de l'élément, de l'espèce et des conditions. Une supériorité des formes organiques est plutôt observée dans des rations à forte présence de nutriments antagonistes, principalement avec le Cu (p. ex. Ward et al., 1996 ; Hansen et al., 2008). Sous conditions helvétiques, le remplacement du Cu, Mn, Zn et Se inorganique par des sources organiques n'a pas eu d'impact pertinent sur le statut minéral de vaches laitières (Kessler et de Faria, 1998). Le remplacement de la source de Zn inorganique par une forme organique a légèrement amélioré la teneur en Zn hépatique (Spears et al., 2004) et la qualité des onglons (Kessler et al., 2003) chez le taurillon à l'engrais. Tandis que le sélénite est absorbé par simple diffusion, les sources de Se organiques suivent les mécanismes d'absorption des acides aminés. Ainsi, la teneur en Se des tissus et du lait est supérieure lorsque le Se inorganique est remplacé par des sources organiques.

Un autre aspect est la neutralité électrochimique des sources organique qui permettrait d'atténuer leur agressivité face à des molécules fragiles également présentes dans les aliments minéraux, telles que les vitamines.

4.1.7. Indicateurs du statut nutritionnel

En dehors des situations de carences ou d'excès prononcés (cliniques), l'évaluation du statut minéral d'un troupeau reste un exercice délicat, tant au niveau du choix des paramètres à analyser et des valeurs de références qu'au niveau de l'interprétation des résultats.

Il est recommandé de procéder à une évaluation de statut minéral que s'il y a soupçon de carence sur l'ensemble du groupe d'animaux et seulement après vérification du plan d'affouragement minéral (tous les minéraux), des analyses de fourrage et de la méthode d'approvisionnement minérale utilisée.

Pour évaluer le statut minéral d'un troupeau, il est recommandé de choisir des animaux sains (minimum 5 individus), représentatif du troupeau (p. ex. présent sur l'exploitation depuis un certain temps, performance de production moyenne) et de stade de production comparable (pour les vaches laitières, privilégier le mois suivant le vêlage). Le moment des prélèvements est choisi sur une période sans grandes perturbations (éviter période de vêlage, changement de type ration, etc.). Les échantillons doivent permettre une analyse de paramètres répondant à une dose-réponse minérale alimentaire et doivent pouvoir être prélevés aisément, sans engendrer de coûts exagérés. Les prélèvements de sang, d'urine et éventuellement de salive (Na) ou de lait (I, Se) sont ainsi à privilégier. La teneur en Cu du foie prélevé après l'abattage est également un indicateur adéquat. Les teneurs minérales de poils ne fournissent aucune indication fiable sur le statut minéral.
La capacité de régulation physiologique permet de maintenir les teneurs des fluides sur la durée, tant que les réserves sont mobilisables. Ainsi, dix jours d'alimentation carencée en Mg suffisent pour observer une baisse en Mg plasmatique ou urinaire chez la vache laitière (Suttle, 2010), mais deux mois d'alimentation carencée en Cu sont nécessaire pour observer une baisse de la teneur en Cu plasmatique (Hansen et al., 2008). Une carence minérale peut être provoquée directement par un apport insuffisant de l'élément, mais aussi par un apport excessif ou insuffisant d'un autre nutriment (antagonismes). Pour l'évaluation du statut minéral d'un troupeau, il est donc indispensable de considérer les antagonismes potentiels par l'établissement de leurs teneurs dans la ration consommée.

Les teneurs de référence pour les bovins adultes, en lactation et sains présentés dans le tableau 4.5 sont issues de Suttle (2010) et d'Ewing et Charlton (2005), sauf exceptions mentionnées. Les teneurs en macro éléments sanguines obtenues de 46 vaches laitières en Suisse par Kilchenmann et Pfäffli (1984) sont conformes avec ces valeurs de références.

La présente révision de l'apport alimentaire en **sélénium** se base sur des expériences de dose-réponse et d'enquêtes de statut en Se en Suisse. Pour atteindre un statut en Se considéré comme adéquat (50 µg Se/l sérum), un apport alimentaire de 0.10 mg Se/kg MS n'était pas suffisant chez le taurillon (Räber et al., 2005). Sur la base de deux enquêtes ayant évalué l'apport alimentaire et mesuré le statut de vaches laitières (Kessler et al., 1991 ; Schlegel et al., non publié) un statut adéquat était atteint dès que la ration contenait 0.19 mg Se/kg MS (Annexe 6). Le statut en Se de la mère est corrélé avec celui du veau nouveau-né. Selon une enquête de Lejeune et al. (2012), le statut en Se médian de veaux nouveau-nés reste critique en Suisse. L'apport en Se recommandé a ainsi été revu à la hausse par rapport aux recommandations de 1999 (cf. chapitres des recommandations d'apport nutritifs).

Tableau 4.5. Indicateurs de statut nutritionnel minéral chez le bovin adulte

Indicateur	Paramètre		*Sang/sérum/plasma*							*Urine*					
			Sensibilité	*Réactivité*	*Milieu*	Carence	Marginal	Adéquat	Excédent	*Sensibilité*	*Réactivité*	Carence	Marginal	Normal	Excédent
Ca	Ca	[mmol/l]	*nulle*		sér./plas.	-	-	2.3 - 2.8	-	*nulle*		-	-	-	-
P	P	[mmol/l]	*moyenne*	*semaines*	sér./plas.	≤ 1.0	1.0 - 1.2	1.2 - 2.2	-	*excès*	*jours*	-	-	-	
Mg	Mg	[mmol/l]	*bonne*	*jours*	sér./plas.	≤ 0.5	0.5 - 0.8	0.8 - 1.4	> 1.6	*bonne*	*jours*	≤ 1.5	1.5 - 3.0	3 - 10	> 15
K	K	[mmol/l]	*bonne*	*jours*	sér./plas.	≤ 2.5	2.5 - 4.0	4.0 - 5.0	> 10.0	*bonne*	*jours*	≤ 20		*20 - 120* [1)]	*> 120* [1)]
Na	Na	[mmol/l]	*faible* [2)]	*jours*	sér./plas.	≤ 130	130 - 135	135 - 150	> 150	*bonne*	*jours*	≤ 1 [2)]	1 - 8	8 - 40	> 60
Cl	Cl	[mmol/l]		*jours*	sér./plas.	≤ 70	70 - 90	90 - 110	> 150		*jours*	≤ 2			
Cu [4)]	Cu	[µmol/l]	*bonne*	*mois*	plasma	< 8 [3)]	8 - 11	11 - 25 [3)]	> 60	*nulle*		-	-	-	-
Co	Co	[µmol/l]			sér./plas.	≤ 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 8.5	> 25.5	*nulle*		-	-	-	-
Co	Vit. B_{12}	[µg/l]			sér./plas.	≤ 0.2	0.2 - 0.4	0.4 - 0.9	-	*nulle*		-	-	-	-
Fe	Fe	[µmol/l]	*bonne*	*jours*	sér./plas.	≤ 9		10 - 20	> 30	*nulle*		-	-	-	-
Fe	Hb	[g/l]	*bonne*	*semaines*	Sang	≤ 90		90 - 140	-	*nulle*		-	-	-	-
I [5)]	I total	[µmol/l]	*bonne*	*semaines*	sér./plas.	≤ 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 3.1	> 5.5	bonne	*jours*	≤ 0.6	0.6 - 0.8	0.8 - 2.0	< 3.0
I [5)]	I inorg.	[µmol/l]	*bonne*	*jours*	sér./plas.	≤ 0.4	0.4 - 0.8	> 0.8	-						
I [5)]	T4	[µmol/l]	*moyenne*	*mois*	sér./plas.	< 0.02		0.02 - 0.13	-	nulle		-	-	-	-
I [5)]	T3	[µmol/l]	*moyenne*	*mois*	sér./plas.	< 1.0	1.0 - 1.3	1.3 - 1.6	-	nulle		-	-	-	-
Zn	Zn	[µmol/l]	*bonne*	*semaines*	sér./plas.	< 8 [3)]	8 - 12	12 - 18 [3)]	> 45	*nulle*		-	-	-	-
Se [6)]	Se	[µmol/l]	*bonne*	*jours*	sér./plas.	≤ 0.4	0.4 - 0.7	> 0.7							
Se	GSH-Px	[UI/g Hb]	*bonne*	*mois*	Sang	< 10		25 - 40	> 150	*nulle*		-	-	-	-

Hb: hémoglobine; T4: hormone thyroïdienne thyroxine; T3: hormone thyroïdienne triiodothryronine; GSH-Px: activité de la glutathion peroxydase

-: paramètre inadéquat; n.d.: pas quantifié

[1)] En Suisse, avec des rations contenant nettement plus que 20 g K /kg MS cette valeur est généralement dépassée

[2)] <130 mmol Na /l salive est indicative pour une carence en Na alimentaire (Kessler et de Faria, 1997)

[3)] Selon Enjalbert et al., 2006

[4)] La teneur en Cu du foie est un très bon indicateur. Adéquat entre 25 - 100 mg Cu /kg.

[5)] La teneur en I du lait est un très bon indicateur. Adéquat ≥30 µg/l (attention à éventuelle contamination de produits d'hygiène de traite)

[6)] Les teneurs en Se du foie et du lait sont de bons indicateurs. Adéquat entre 0.25 - 0.5 mg Se /kg foie et >15 µg Se /l lait.

4.1.8. Carences minérales cliniques

Les carences minérales prononcées (cliniques) les plus rencontrés sont décrites ci-dessous :

La capacité de stocker et de mobiliser des réserves minérales de l'animal, permet un approvisionnement suffisant durant des périodes impliquant des fortes demandes. En début de lactation, la demande en **calcium** et **phosphore** est soudainement accrue par son export via le lait et nécessite une absorption intestinale de Ca accrue et leur résorption du squelette qui sera repourvue en 2e moitié de lactation (Liesegang et al., 2007b). Cette forte demande en Ca provoque chez la vache laitière (principalement dès la 3e lactation ; rarement, voire pas du tout chez la primipare) une baisse du statut sanguin en Ca (1.6 - 2.0 mmol/l) et en P sans observer de signes clinique. Si l'animal ne parvient pas à suffisamment activer les mécanismes de régulation pour palier à la forte hausse du besoin en Ca, l'apparition des symptômes cliniques de l'**hypocalcémie**, appelée aussi fièvre du lait apparaissent. Dans ce cas, la teneur en Ca du sérum sanguin chez la vache laitière s'abaisse à une valeur de référence < 1.6 mmol Ca/l. Une prophylaxie appropriée autour de la période de vêlage permet de réduire le risque d'occurrence d'une hypocalcémie. Ci-dessous, une liste non exhaustive des mesures de prévention alimentaires pouvant être appliquées chez la vache laitière durant les 3 à 4 semaines avant le vêlage (Rérat, 2005; Liesegang et al., 2006a; Rérat et al., 2009; Rérat et Hess, 2012; Rérat et Schlegel, 2014; Oezçelik et al., 2017;Meyer-Binzegger et al., 2021):

- Couverture des besoins en Ca, P et vitamine D et éviter leur apport excessif.
- Augmenter l'apport en Mg à 2.5 - 3.0 g/kg MS par rapport au besoin d'une vache tarie avant sa préparation au vêlage (1.8 – 2.0 g/kg MS).
- Favoriser l'acidose métabolique avant le vêlage à l'aide d'une ration possédant un bilan cation/anion (BACA) inférieur à 150 meq/kg MS. La valeur BACA d'une ration (meq/kg MS) se calcule ainsi : (%Na x 435 + %K x 256) – (%Cl x 282 + %S x 624). Une ration favorable à une acidose métabolique est pauvre en K (p. ex. prairie extensive, maïs plante entière). L'ajout de sels anioniques, tel que les chlorures ou les sulfates de Ca, de Mg ou d'ammonium abaissent la valeur BACA de la ration et peuvent aider à prévenir une hypocalcémie, pour autant que la rations ne soit pas composée de fourrages riches en K. L'efficacité des sels anioniques est similaire chez la vache et la chèvre laitière, mais limitée chez la brebis (Liesegang, 2008).
- Utilisation de préparations à base de Ca facilement solubles (gel, bolus, liquide) et/ou de vitamine D (p. ex 1,25-dihydroxycholecalciferol) immédiatement avant le vêlage.
- Approvisionnement adapté en énergie durant la période de tarissement.
- Sinon, de manière générale, éviter le stress et donner régulièrement accès à la lumière naturelle favorisant la synthèse de vitamine D.

Une hypocalcémie peut apparaître suite au début de lactation chez la vache et la chèvre laitière, tandis qu'elle peut déjà apparaître en fin de gestation chez la brebis. Comme la brebis doit déjà faire face à une demande accrue en Ca en fin de gestation, surtout en présence de jumeaux, la capacité de résorption osseuses semble être mieux préparée (Wilkens et al., 2014). La brebis réagit donc moins au changement de demande en Ca en début de la lactation que la vache et la chèvre (Liesegang et al., 2006b, 2007a).

Contrairement au Ca et au P, l'adulte est pratiquement incapable de mobiliser ses réserves en **magnésium** et en électrolytes (K, Na et Cl). En l'espace de quelques jours, un approvisionnement en Mg inadéquat conduit à des modifications des teneurs en Mg dans les fluides sanguins et urinaires. Avec un apport en Mg insuffisant prolongé, la carence peut devenir clinique et mener à la tétanie **hypomagnésémique** (tétanie d'herbage / d'étable). Un régime pauvre en Mg combiné avec un apport pauvre en fibres, mais élevé en K est la principale origine de ce dérèglement métabolique. Un fort déficit énergétique ou des situations de stress favorisent la lipolyse qui, elle, requiert du Mg comme cofacteur enzymatique. Ce type de situation déséquilibre la répartition du Mg dans le corps et accentue le risque de carence clinique. Contrairement aux bovins, la chèvre est rarement sujette à la tétanie hypomagnésémique. Les mesures suivantes permettent de prévenir cette carence chez la vache laitière ou allaitante:

- Couverture des besoins en Mg en fonction de la teneur en K et en cellulose alimentaire.
- Couverture des besoins en Na.
- Couverture des besoins énergétiques.
- Limiter le stress (physique, thermique).
- Limiter la teneur en K du fourrage par une fumure potassique raisonnée.

Les vaches lèchent les blocs de sel et se lèchent entre-elles, c'est normal. Par contre, il leur arrive de dévier leur comportement, se mettent à lécher, de manière répétée, les murs, les poteaux ou les auges. Si plusieurs animaux d'un troupeau ont un tel comportement (**pica**) une carence en **sodium** ou éventuellement en **cobalt** peut en être la cause. Les symptômes d'une carence en Na peuvent rester longtemps inaperçus. Ce n'est que lorsque la salive ne parvient plus à compenser l'insuffisance de l'apport de Na, que des symptômes cliniques apparaissent, tel que le pica.

Une carence en **sélénium** et en **vitamine E** peut entraîner des troubles de croissance et des lésions musculaires (**maladie du muscle blanc**) pouvant toucher le muscle cardiaque (arrêt cardiaque) ou la musculature du squelette (troubles locomoteurs, paralysie des membres postérieurs, problèmes de déglutition). Cette carence est fréquemment observée chez le veau et l'agneau, car elle se développe souvent déjà au stade de fœtus si la mère n'est pas suffisamment pourvue en Se et en vitamine E. La prévention de la maladie du muscle blanc nécessite avant tout un approvisionnement correct en Se et en vitamine E de la mère, qui selon Abdelraham et Kincaid (1995) devrait être au niveau de 3 mg Se/j durant le dernier trimestre de gestation, faute de quoi, ses taux sériques en Se sont réduits. Dans les exploitations où les cas de maladie du muscle blanc sont relativement fréquents, une action préventive directe sur le veau s'est avérée efficace. Celle-ci, peut avoir lieu, par exemple, par l'intermédiaire d'une injection de Se et de vitamine E ou par l'administration d'une pâte à base de Se et de vitamine E (drench). Chez l'adulte, la carence sélénique n'est pas directement visible, mais elle (et/ou la vitamine E) affecte indirectement la fertilité et peut favoriser les cas de mammites.

4.1.9. Seuils de tolérance

Une alimentation minérale excessive (tableau 4.6) peut conduire, sur une durée prolongée, à des troubles métaboliques provoqués directement par la toxicité de l'élément en excès ou indirectement par une carence induite à un autre élément. Les seuils de tolérance des oligo-éléments se situent au-delà des teneurs alimentaires maximales autorisées en Suisse.

Tableau 4.6. Seuils de tolérance minérale alimentaire chez le bovin, ovin et caprin (NRC, 2005)

	[g/kg MS]		[mg/kg MS]		[mg/kg MS]
Ca	15 - 20	**Cu**[2)]	15 / 40	**Al**	1000
P	10	**Co**	25	**Cd**	25
Mg	6	**Fe**	500	**F**	500
K	30[1)]	**I**[3)]	8	**Ni**	50
NaCl	40	**Mo**	10	**V**	50
S	5	**Mn**	2000		
		Se	5		
		Zn[2)]	300 / 500		

[1)] Origine de cette valeur basse: réduction de l'absorbabilité du Mg augmentation du risque de fièvre de lait.

[2)] Valeur inférieure pour ovin; valeur supérieure pour caprin et bovin.

[3)] INRA, 1988

Les cas d'intoxications minérales chroniques sont généralement rares, lorsque les plans d'alimentation sont suivis. Il se peut, toutefois que certains aliments soient contaminés conduisant à des intoxications. Ainsi, par exemple, l'alimentation de co-produits laitiers ayant séjourné dans des cuves en Cu peuvent en être enrichi (Sieber et al., 2003). La teneur en Cu de la ration peut ainsi dépasser le seuil de tolérance. Les symptômes d'un **empoisonnement au cuivre** sont, entre autres, une coloration jaune des muqueuses (jaunisse), une attitude craintive et des crampes. En outre, l'urine peut présenter une coloration rougeâtre. L'ajout d'acides en tant qu'agent conservateur, peut accentuer la problématique (Kessler, 2003). Le mouton, est en outre, particulièrement sensible à l'apport en Cu, car sa capacité de rejeter le Cu en excès par la bile semble réduite. Un aliment minéral complémenté de Mo devrait permettre de limiter un risque de toxicité en Cu chez le mouton n'ayant qu'un fourrage riche en Cu à disposition.

4.2. Vitamines *(chapitre original de la version 1999)*

Actuellement, 13 vitamines sont connues. La plupart d'entre elles doivent être considérées comme des groupes de substances similaires, ayant les mêmes effets qualitatifs. Les vitamines sont divisées en deux principaux groupes: les vitamines liposolubles et hydrosolubles (tableau. 4.7). Pour les ruminants dont la panse est complètement développée, les provitamines A, et parmi celles-ci surtout le β-carotène, ainsi que les vitamines A, D et E, ont une importance pratique. Dans certaines conditions, la vitamine B1 et l'acide nicotinique peuvent aussi jouer un rôle. Pour les autres vitamines, les synthèses réalisées par les micro-organismes de la panse permettent en général au ruminant de ne pas être dépendant d'un apport alimentaire. En revanche, les vitamines hydrosolubles jouent un rôle pratique dans l'alimentation des animaux dont la panse n'est pas encore fonctionnelle (veau, agneau, chevreau).

Tableau 4.7. Vitamines liposolubles et hydrosolubles (groupes de vitamines)

Vitamines liposolubles	Vitamines hydrosolubles	
Vitamine A	Vitamine C	Acide pantothénique
Provitamine A (dont le (β–carotène)	Vitamine B1	Biotine
Vitamine D	Vitamine B2	Acide folique
Vitamine E	Vitamine B6	
Vitamine K	Vitamine B12	
	Acide nicotinique	

Les besoins en vitamines des ruminants sont en majeure partie estimés avec la méthode dose-réponse qui est basée sur différents critères d'appréciation (croissance, reproduction, stockage dans des organes précis, signes de carences typiques, état immunitaire, etc.). Les recommandations pour les différentes catégories d'animaux (voir les chapitres correspondants) permettent de satisfaire les besoins en vitamines des ruminants dans des conditions normales de garde et d'alimentation.
Remarque : Si, les recommandations d'apport en vitamines ne sont pas ou plus compatibles avec la loi ou des règlements de labels spécifiques, ces derniers priment sur les recommandations d'apport.

4.3. Bibliographie

Abdelraham M. M. and Kincaid R. L., 1995. Effect of selenium supplementation of cows on maternal transfer of selenium to fetal and newborn calves. Journal of Dairy Science 78, 625–630.

Adediji O. and Suttle N. F., 1999. Influence of diet type, K and animal species on the absorption of magnesium by ruminants. Proceeding of the Nutrition Society 58, 31A.

AFRC, 1991. Technical Committee on Responses to Nutrients, Report 6, A reappraisal of the calcium and phosphorus requirements of sheep and cattle. Nutrition Abstract Reviews, 61, 573–612.

CVB, 2005. Handleiding Mineralenvoorziening rundvee, schapen, geiten. Centraal veevoederbureau, Lelystadt, The Netherlands.

Dias R. S., López S., Montanholi Y. R., Smith B., Haas L. S., Miller S. P. and France J., 2013. A meta-analysis of the effects of dietary copper, molybdenum and sulfur on plasma, liver copper, weight gain and feed conversion in growing-finishing cattle. Journal of Animal Science 91, 5714–5723.

Durand M and Komisarczuk S., 1988. Influence of major minerals on rumen microbiota. Journal of Nutrition 118, 249–260.

Enjalbert F., Lebreton P. and Salat O., 2006. Effect of copper, zinc and selenium status on performance and health in commercial dairy and beef herds : retrospective study. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 90, 459–466.

Ewing W.N. and Charlton S.J., 2005. The Minerals Directory. Context, Packington, United Kingdom.

Franke K., Meyer U., Wagner H., Hoppen H. O. and Flachowsky G., 2009a. Effect of various iodine supplementations, rapeseed meal application and two different iodine species on the iodine status and iodine excretion of dairy cows. Livestock Science 125, 223–231.

Franke K., Meyer U., Wagner H. and Flachowsky G., 2009b. Influence of various iodine supplementation levels and two different iodine species on the iodine content of the milk of cows fed rapeseed meal or distillers dried grains with solubles as the protein source. Journal of Dairy Science 92, 4514–4523.

GfE, 2001, Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchtrinder. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, Deutschland.

Hansen S. L., Schlegel P., Legleiter L. R., Lloyd K. E. and Spears J. W., 2008. Bioavailability of copper from copper glycinate in steers fed high dietary sulfur and molybdenum. Journal of Animal Science 86, 173–179.

Hansen S. L. and Spears J. W., 2009. Bioaccessibility of iron from soil is increased by silage fermentation. Journal of Dairy Science 92, 2896–2905.

House W. A. and Bell A. W., 1993. Mineral accretion in the fetus and adnexia during late gestation in Holstein cows. Journal of Dairy Science 76, 2999–3010.

INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – valeurs des aliments. Editions Quae, Versailles, France.

Jongbloed A. W., Kemme P. A., de Groote G., Lippens M and Meschy F., 2002. Bioavailability of major and trace minerals. International Association of the European Manufacturers, Brussels, Belgium.

Kessler J. und Arrigo Y., 1996. Wiederkäuer: Kobaltangebot und Nährstoffverwertung. Agrarforschung 3, 7–9.

Kessler J., Friesecke H und Kunz P., 1991. Selen-Vitamin E: Versorgung der Milchkuh während der Winterfütterung. Landwirtschaft Schweiz 4, 607–611.

Kessler J. und de Faria A., 1998. Organische Spurenelementmischung in der Milchviehfütterung. Agrarforschung 5, 273–276.

Kessler J., 2000a. Kaliumreiches Wiesenfutter belastet Stoffwechsel der Milchkuh. Agrarforschung 7, 466–471.

Kessler J., 2000b. Dürrfutter-Kraftfutterangebot und Viehsalzversorgung des Wiederkäuers. Agrarforschung 7, 200–205.

Kessler J., 2003. Du cuivre pour les moutons et les chèvres – mais avec modération. Petits ruminants 9, 6–11.

Kessler J., Morel I. and Dufey P. -A., 2003. Effect of organic zinc sources on performance, zinc status and carcass, meat and claw quality in fattening bulls. Livestock Production Science 81, 161–171.

Kilchenmann H. und Pfäffli J., 1984. Referenzwerte für Mineralstoffe, Enzyme und Stoffwechselprodukte im Serum des Rindes und Berechnung der prozentualen Kreatininclearance von Mineralstoffen bei Milchkühen. Dissertation Universität Bern.

Kronqvist C., Emanuelson U., Spörndly R. and Holtenius K, 2011. Effects of prepartum dietary calcium level on calcium and magnesium metabolism in periparturient dairy cows. Journal of Dairy Science 94, 1365–1373.

Lejeune B., Schelling E. and Meylan M., 2012. Gammaglobulin and selenium status in healthy neonatal dairy calves in Switzerland. Schweizer Archiv für Tierheilkunde, 154, 389–396.

Liesegang A., Chiappi C., Risteli J., Kessler J. and Hess H. -D., 2006a. Influence of different calcium contents in diets supplemented with anionic salts on bone metabolism in periparturient dairy cows. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 91, 120–129.

Liesegang A., Risteli J. and Wanner M., 2006b. The effects of first gestation and lactation on bone metabolism in dairy goats and milk sheep. Bone 38, 792–802.

Liesegang A., Riner K. and Boos A., 2007a. Effects of gestation and lactation on vitamin D receptor amounts in goats and sheep. Domestic Animal Endocrinology 33, 190–202.

Liesegang A., Risteli J and Wanner M., 2007b. Bone metabolism of milk goats and sheep during second pregnancy and lactation in comparison to first lactation. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 91, 217–225.

Liesegang A., 2008. Influence of anionic salts on bone metabolism in periparturient dairy goats and sheep. Journal of Dairy Science, 91, 2449–2460.

Lopez-Guiza J. M. and Satter L. D., 1992. Effect of copper and cobalt addition on digestion and growth in heifers fed diets containing alfaalfa silage or corn crop residues. Journal of Animal Science 75, 247–256.

Oberson J.-L., Probst S. and Schlegel P., 2019. Magnesium absorption as influenced by the rumen passage kinetics in lactating dairy cows fed modified levels of fibre and protein. Animal 13, 1412-1420.

Meschy F., 2002. Recommandations d'apport en phosphore absorbé chez les ruminants. Rencontre Recherche Ruminants, 279- 285.

Meschy F. et Corrias R., 2005. Recommandations d'apport alimentaire en calcium et magnésium absorbables pour les ruminants. Rencontre Recherche Ruminants, 221–224.

Meschy F., 2010. Nutrition minérale des ruminants. Editions Quae, Versailles, France.

Meyer-Binzegger M., Ollagnier C., Eggerschwiler L., Bühler K., Meylan M. and Schlegel P., 2021b. Potential of a rumen bolus containing 1,25 dihydroxycholecalciferol glycosides for the prevention of hypocalcemia in primiparous and multiparous dairy cows. Animal (Submitted).

NorFor, 2001. The Nordic feed evaluation system. EAAP publication N°130. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.

NRC, 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. The National Academies Press, Washington, U.S.A.

NRC, 2005. Mineral tolerance of animals. The National Academies Press, Washington, U.S.A.

Özçelik R., Bruckmaier R. M. and Hernández-Castellano L. E., 2017. Prepartum daylight exposure increases serum calcium concentrations in dairy cows at the onset of lactation. Journal of Animal Science 95, 4440–4447.

Pope A. L., Moir R. J., Somers M., Underwood E. J. and White C. L., 1979. The effect of sulphur on ^{75}Se absorption and retention in sheep. Journal of Nutrition 109, 1448–1455.

Räber M., Geyer H., Kessler J. und Gutzwiller A., 2005. Einfluss einer hohen Selenzufuhr auf den Selenstatus, die Leberfunktion und auf die Klauenqualität von Maststieren. Schweizer Archiv für Tierheilkunde 150, 57–67.

Rérat M., 2005. La fièvre du lait chez la vache laitière. ALP actuel N°20. Posieux, Suisse.

Rérat M., Philipp A., Hess H. -D. and Liesegang A., 2009. Effect of different potassium levels in hay on acid-base status and mineral balance in periparturient dairy cows. Journal of Dairy Science, 92, 6123–6133.

Rérat M. et Hess H. -D., 2012. Indicateurs urinaires du statut acido-basique pour la prédiction de la fièvre du lait chez la vache laitière. Recherche Agronomique Suisse 3, 68–73.

Rérat M. and Schlegel P., 2014. Effect of dietary potassium and anionic salts on acid-base and mineral status in periparturient cows. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 98, 458–466.

Rosa I. V., Henry P. R. and Ammerman C. B., 1982. Interrelationship of dietary phosphorus, aluminium and iron on performance and tissue mineral composition in lambs. Journal of Animal Science 55, 1231–1240.

Schlegel P., 2012. Nouvelles recommandations d'apport en phosphore chez le bovin laitier. ALP actuel N°44. Posieux, Suisse.

Schlegel P., Rérat M., Girard M. and Gutzwiller A., 2015. Influence of diet type and dietary magnesium on mineral status in lactating dairy cows. Book of Abstracts of the 65th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science.

- Schlegel P., Walther B. Haldimann M et Bérard J., 2021. Le lait, source d'iode – Actions envisageables dans l'exploitation laitière pour atteindre une teneur ciblée en iode dans le lait. Agroscope Transfer 390.
- Schlegel P., Chassot C., Fragnière M. et Philipona J. -C., *non publié*. Enquête sur l'apport minéral alimentaire et le statut minéral de troupeaux laitiers.

Schonewille J. T., Everts H., Jittakhot S. and Beynen A. C., 2008. Quantitative prediction of magnesium absorption in dairy cows. Journal of Dairy Science 91, 271–278.

Schwarz F. J., Kirchgessner M. and Stangl G. I., 2000. Cobalt requirement of beef cattle - Feed intake and growth at different levels of cobalt supply. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 83, 121–131.

Stangl G. I., Schwarz F. J., Muller H. and Kirchgessner M., 2000. Evaluation of the cobalt requirement of beef cattle based on vitamin B12, folate, homocysteine and methylmalonic acid. British Journal of Nutrition 84, 645–653.

- Sieber R., Rehberger B., Schaller F. und Gallmann P.U., 2003. Technologische Aspekte von Kupfer in Milchprodukten und gesundheitliche Bedeutung des Kupfers. FAM-Info, N°451. Eidgenössische Forschungsanstalt für Milchwirtschaft, Bern, Schweiz.
- Sieber R., 2012. Zusammensetzung von Milch und Milchprodukten schweizerischer Herkunft. ALP Science N°538, Agroscope, Bern, Schweiz.
- Spears J. W., Schlegel P., Seal M. C. and Lloyd K. E., 2004. Bioavailability of zinc from zinc sulfate and different organic zinc sources and their effects on ruminal volatile fatty acid proportions. Livestock Production Science 90, 211–217.

Suttle N. F. and Mc Lauchlan M., 1976. Predicting the effects of dietary molybdenum and sulphur on the availability of copper to ruminants. Proceedings of the Nutrition Society 35, 11A–23A.

Suttle N. F., 1983. Effects of Molybdenum concentration in fresh herbage, hay and semi-purified diets on the copper metabolism of sheep. Journal of Agricultural Science, Cambridge 100, 651–656.

Suttle N. F., 2010. Mineral nutrition of Livestock. CABI, Oxfordshire, United Kingdom

- van der Reijden O.L., Galetti V., Hulmann M., Krzystek A., Haldimann M., Schlegel P., Manzocchi E., Bérard J., Kreuzer M., Zimmermann M.B. and Herter-Aeberli I. 2018. The main determinants of iodine in cows' milk in Switzerland are farm type, season and teat dipping. British Journal of Nutrition, 119, 559-569.
- van der Reijden O.L., Galetti V., Herter-Aeberli I., Zimmermann M.B., Zeder C., Krzystek A., Haldimann M., Barmaz A., Kreuzer M., Bérard J. and Schlegel P., 2019. Effects of feed iodine concentrations and milk processing on iodine concentrations of cows' milk and dairy products, and potential impact on iodine intake in Swiss adults. British Journal of Nutrition 122, 172-185.
- Walther B., Wechsler D., Schlegel P. and Haldimann M 2018. Iodine in Swiss milk depending on production (conventional versus organic) and on processing (raw versus UHT) and the contribution of milk to the human iodine supply. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 46, 138-143.

Ward J. D., Spears J. W. and Kegley E. B., 1996. Bioavailability of copper proteinate and copper carbonate relative to copper sulphate in cattle. Journal of Dairy Science79, 127–132.

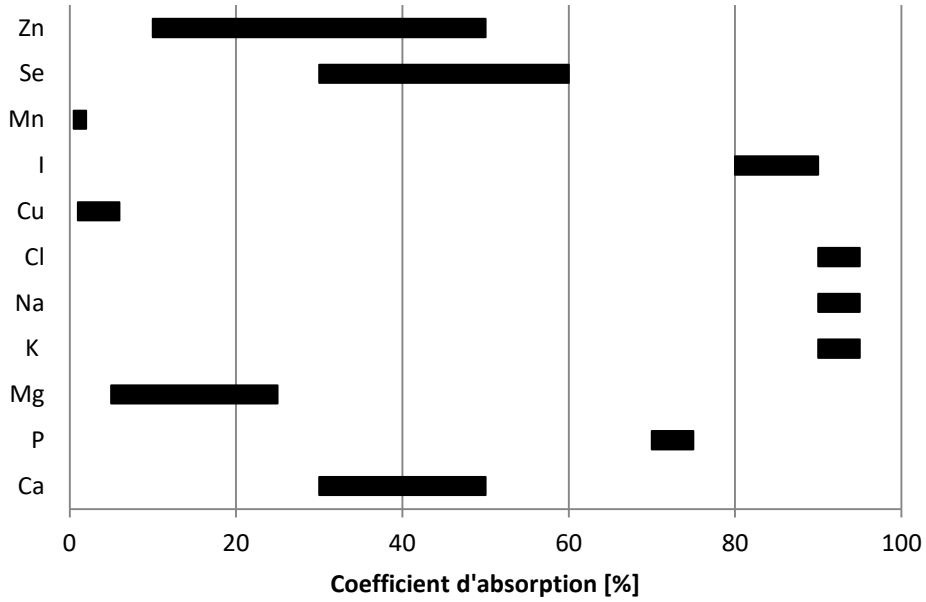
Weiss W. P., 2004. Macromineral digestion by lactating dairy cows: factors affecting digestibility of magnesium. Journal of Dairy Science 87, 2167–2171.

- Wilkens M. R., Liesegang A., Richter J., Fraser D. R., Breves G. and Schröder B., 2014. Differences in peripartal plasma parameters related to calcium homeostasis of dairy sheep and goats in comparison with cows. Journal of dairy Research, 81, 325–332.

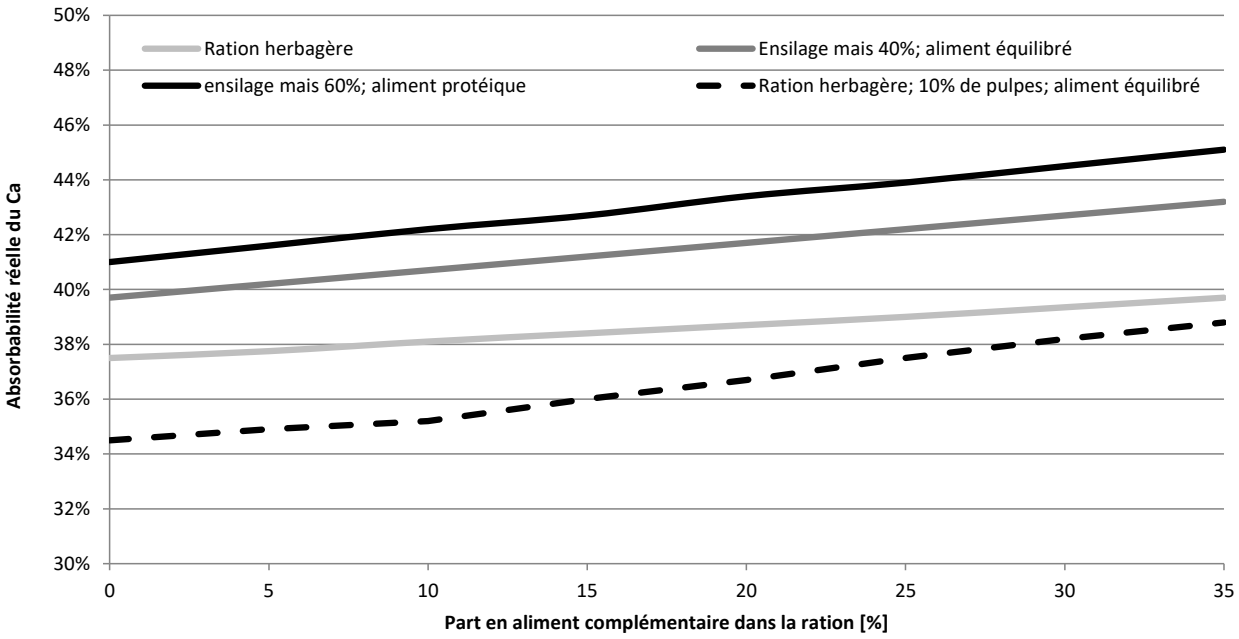
Yuangklang C., Wachirapakorn C., Mohamed H. E., Alhaidary A. and Beynen A. C, 2010. Effect of Calcium Supplementation on Growth, Nutrient Digestibility and Fecal Lactobacilli in Dairy Calves. American Journal of Animal and Veterinary Sciences 5, 127–131.

Annexes

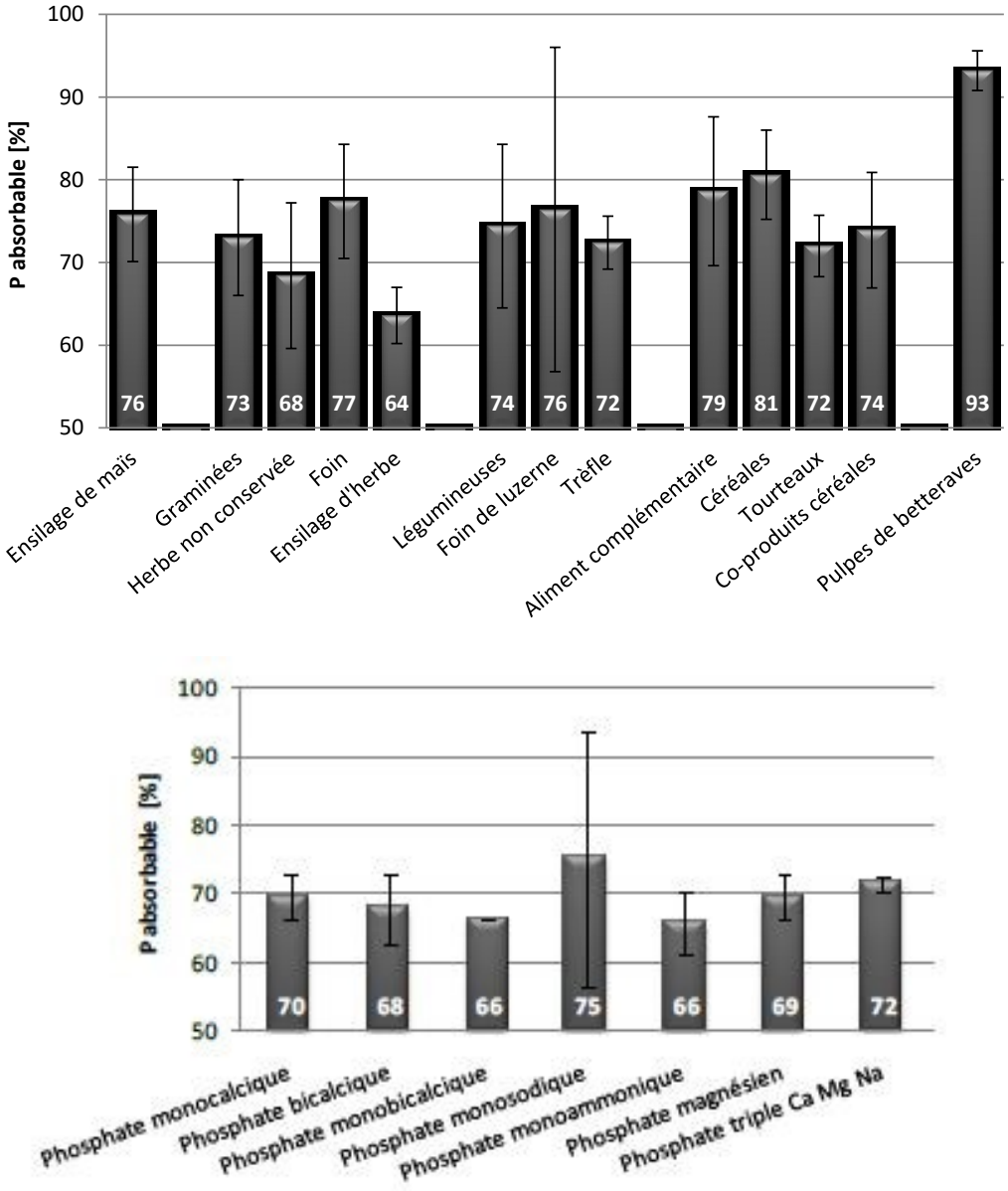
Annexe 1. Plage du coefficient d'absorption minéral chez le ruminant



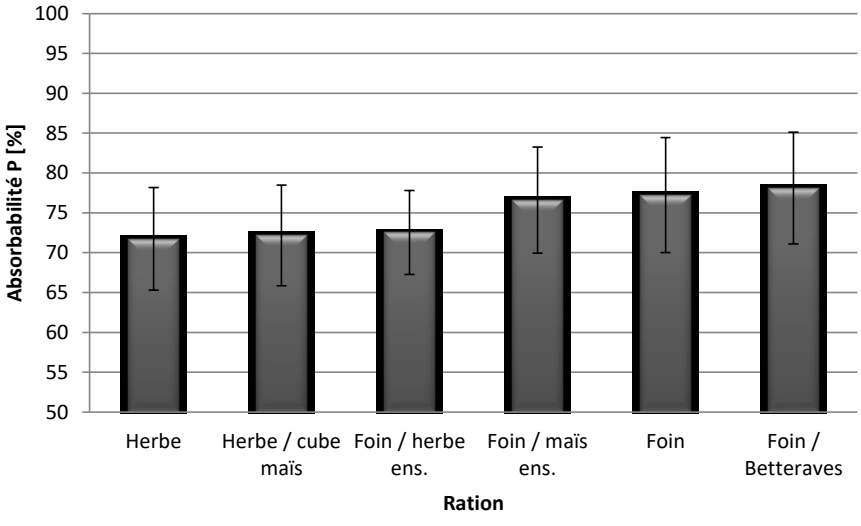
Annexe 2. Coefficient d'absorption du calcium de rations types en fonction de l'apport en aliments complémentaires



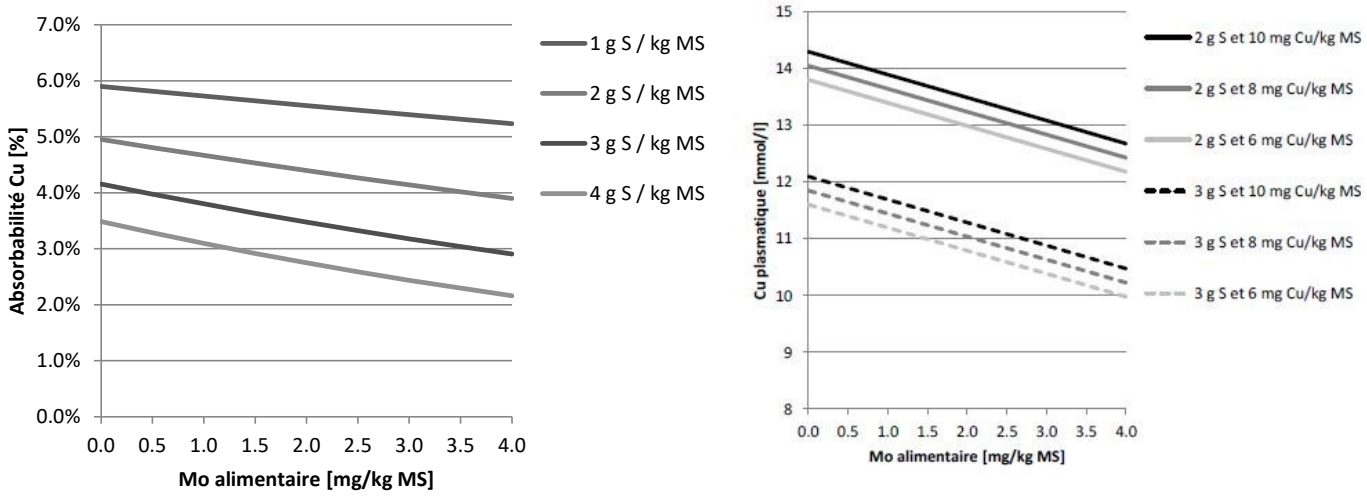
Annexe 3. Coefficient d'absorption du phosphore d'aliments (Meschy, 2002, Jongbloed et al., 2002)



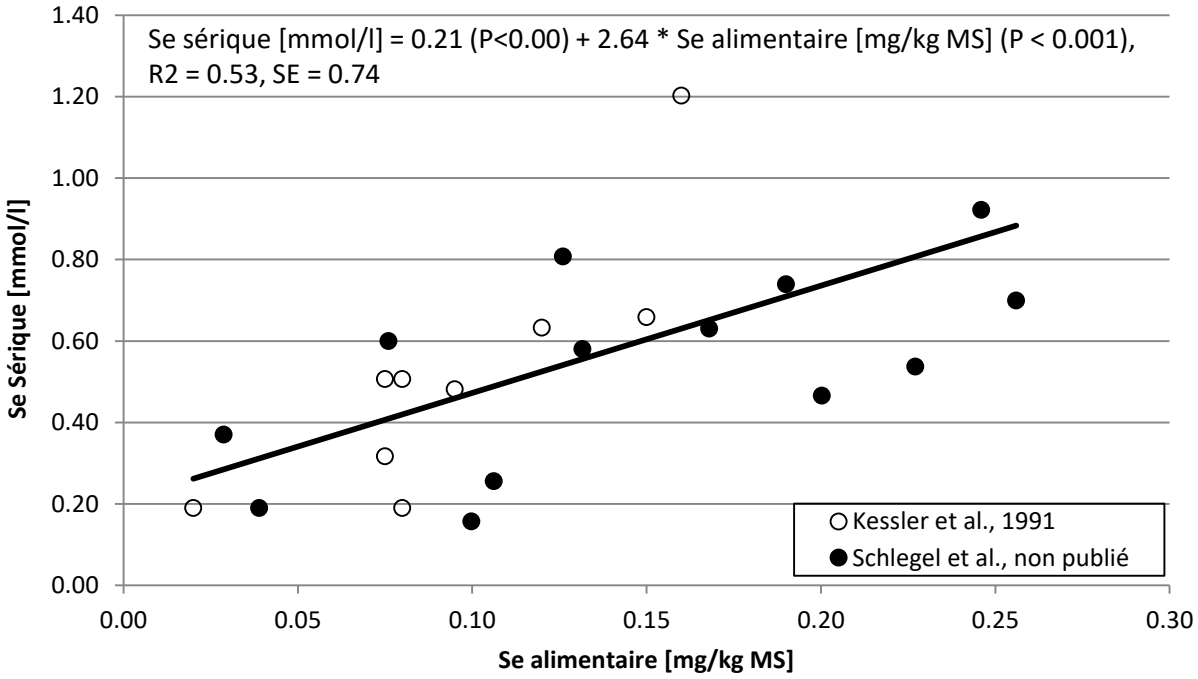
Annexe 4. Coefficient d'absorption du phosphore de rations types



Annexe 5. Coefficient d'absorption du cuivre (Suttle et Mc Lauchlan, 1979) et teneur plasma cuprique (Dias et al., 2013) en fonction de la présence alimentaire en molybdène et en soufre



Annexe 6. Statut sélénique moyen de troupeaux de vaches laitières en lactation en fonction de la teneur alimentaire en sélénium



Version: Juin 2021
Éditeur: Agroscope
Rédaction: P. Schlegel
Copyright: Agroscope
Svp reproduire le contenu avec référence