



HAL
open science

Évaluation du statut en oligo-éléments de vaches allaitantes multipares autour de la mise-bas en système herbager

Anne-Laure Guittard

► **To cite this version:**

Anne-Laure Guittard. Évaluation du statut en oligo-éléments de vaches allaitantes multipares autour de la mise-bas en système herbager. Médecine vétérinaire et santé animale. 2022. dumas-03980140

HAL Id: dumas-03980140

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03980140v1>

Submitted on 9 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉVALUATION DU STATUT EN OLIGO-ELEMENTS DE VACHES ALLAITANTES MULTIPARES AUTOUR DE LA MISE-BAS EN SYSTEME HERBAGER

THESE D'EXERCICE

pour obtenir le titre de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

GUITTARD Anne-Laure

Directrice de thèse : Mme Annabelle MEYNADIER

JURY

PRESIDENT :
M. Gilles FOUCRAS

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

ASSESEURS :
Mme Annabelle MEYNADIER
M. Laurent-Xavier NOUVEL

Professeure à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MEMBRE INVITEE :
Mme Barbara GALMICHE

Directrice du laboratoire IODOLAB

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE**

Liste des directeurs/assesseurs de thèse de doctorat vétérinaire

Directeur : Professeur Pierre SANS

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie, thérapeutique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et industrie des aliments d'origine animale*
- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, statistiques, modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la reproduction, endocrinologie*
- Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du bétail et des animaux de basse-cour*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie médicale animale et comparée*

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et industrie des aliments*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, anatomie pathologique*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootéchnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et thérapeutique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des ruminants*

PROFESSEURS 2^{ème} CLASSE

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des équidés et des carnivores*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et toxicologie*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation animale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, imagerie médicale*
- Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles*
- M. **RABOISSON Didier**, *Médecine de population et économie de la santé animale*
- M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et infectiologie*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la reproduction*
- Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et industrie des denrées alimentaires d'origine animale*
- Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
- M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et toxicologie*
- M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et mathématiques*
- M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
- Mme **PRIYENKO Nathalie**, *Alimentation*

MAITRES DE CONFERENCES CLASSE NORMALE

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **BRET Lydie**, *Physique et chimie biologiques et médicales*
- Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*
- M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie, imagerie médicale*
- M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
- Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie, bactériologie, pathologie infectieuse*
- Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et industrie des aliments*
- M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*
- Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*
- Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*
- Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie, analgésie*
- M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des équidés*
- Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
- M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*
- M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*
- M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire, maladies animales réglementées*
- Mme **WARET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*
- Mme **PALIERNE Sophie**, *Pathologie chirurgicale*
- M. **GAIDE Nicolas**, *Anatomie Pathologique*

INGENIEURS DE RECHERCHE

- M. **AUMANN Marcel**, *Urgences, soins intensifs*
- M. **AUVRAY Frédéric**, *Santé digestive, pathogénie et commensalisme des entérobactéries*
- M. **CASSARD Hervé**, *Pathologie des ruminants*
- M. **CROVILLE Guillaume**, *Virologie et génomique cliniques*
- Mme **DEBREUQUE Maud**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- Mme **DIDIER Caroline**, *Anesthésie, analgésie*
- Mme **DUPOUY GUIRAUTE Véronique**, *Innovations thérapeutiques et résistances*
- Mme **GAILLARD Elodie**, *Urgences, soins intensifs*
- Mme **GEFFRE Anne**, *Biologie médicale animale et comparée*
- Mme **GRISEZ Christelle**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **JEUNESSE Elisabeth**, *Bonnes pratiques de laboratoire*
- Mme **PRESSANTI Charline**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **RAMON PORTUGAL Félipe**, *Innovations thérapeutiques et résistances*
- M. **REYNOLDS Brice**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
- Mme **ROUCH BUCK Pétra**, *Médecine préventive*
- M. **DELPONT Mattias**, *Clinique Aviaire*
- Mme **POUJADE Agnès**, *Anatomie pathologique Vétérinaire*
- Mme **LAYSSOL-LAMOUR Catherine**, *Imagerie Médicale*
- Mme **SAADA Chloé**, *Gestion intégrée de la santé des ruminants*

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Docteur Gilles FOUCRAS,

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Pathologie du bétail

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être le Président de jury de ma thèse,
Respectueux remerciements.

A Madame la Docteur Annabelle MEYNADIER,

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Alimentation

Pour avoir accepté de m'accompagner pour ce travail, pour sa patience, ses conseils, son aide précieuse et son soutien tout au long des travaux d'expérimentation et de rédaction,
Sincères remerciements.

A Monsieur le Docteur Laurent-Xavier NOUVEL,

Maître de Conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Infectiologie

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être membre du jury de ma thèse,
Sincères remerciements.

A Madame Barbara GALMICHE,

Directrice du laboratoire Iodolab

Pour avoir accepté de participer à mon étude expérimentale,
Sincères remerciements.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements,

A **Madame Barbara GALMICHE** et à toute son équipe,
Pour l'intérêt apporté à mon étude expérimentale et d'avoir accepté de réaliser les analyses des oligo-éléments. Sans votre aide, mon étude n'aurait pas pu être possible.

Aux associés du GAEC des Baraques, **Monsieur Didier CHABRUT et Monsieur Romain CHABRUT**,
Pour avoir accepté de travailler avec moi pour mon étude expérimentale, pour leur confiance, pour le temps qu'ils m'ont accordé et pour leur aide et leur soutien.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	5
TABLE DES MATIERES	9
LISTE DES TABLEAUX.....	15
LISTE DES FIGURES.....	19
LISTE DES ABREVIATIONS.....	23
INTRODUCTION	25
PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	27
1 Les oligo-éléments chez les bovins.....	29
1.1 Les principaux rôles biochimiques et physiologiques des oligo-éléments chez les bovins.....	29
1.1.1 Le cuivre	29
1.1.2 Le zinc	31
1.1.3 L'iode	31
1.1.4 Le sélénium	32
1.2 Le métabolisme des oligo-éléments chez les bovins adultes	33
1.2.1 Absorption, transport et stockage du cuivre	33
1.2.2 Homéostasie digestive et élimination du zinc	34
1.2.3 Absorption, transport et élimination du sélénium	35
1.2.4 Absorption, stockage et homéostasie de l'iode.....	36
2 Les besoins en oligo-éléments : étude des carences et des excès chez les bovins	37
2.1 Les besoins en oligo-éléments chez les bovins adultes et les veaux	37
2.1.1 L'estimation des besoins quotidiens en oligo-éléments	37
2.1.2 Les apports journaliers recommandés	39
2.1.3 Les besoins physiologiques en oligo-éléments autour de la mise-bas	39
2.1.3.1 Le transfert des oligo-éléments de la mère au fœtus et les conséquences sur les besoins de la mère.....	39
a. Le cuivre	40
b. Le zinc.....	41

c. L'iode.....	41
d. Le sélénium	42
2.1.3.2 Les apports en oligo-éléments chez les nouveau-nés	43
2.1.3.3 Les oligo-éléments pour la santé de la mère en péripartum	45
2.2 Notion de carence chez les bovins	49
2.2.1 Les carences primaires en oligo-éléments.....	49
2.2.2 Les carences secondaires en oligo-éléments.....	49
2.2.3 Les manifestations cliniques lors de carences	52
2.2.3.1 La carence en cuivre.....	53
a. Signes cliniques spécifiques et signes d'appels.....	53
b. Signes cliniques autour de la reproduction	55
c. Traitements préventifs et curatifs.....	56
2.2.3.2 La carence en zinc	56
a. Signes cliniques spécifiques et signes d'appels.....	56
b. Signes cliniques autour de la reproduction	58
c. Traitements préventifs et curatifs.....	58
2.2.3.3 La carence en iode	59
a. Signes cliniques chez le veau	59
b. Signes cliniques chez l'adulte	60
c. Traitements préventifs et curatifs.....	60
2.2.3.4 La carence en sélénium	61
a. Signes cliniques chez le veau	61
b. Signes cliniques autour de la reproduction chez l'adulte.....	62
c. Traitements préventifs et curatifs.....	63
2.3 Manifestations cliniques et traitements lors d'excès	64
2.3.1 L'excès en cuivre	64
2.3.2 L'excès en zinc	65
2.3.3 L'excès en iode	66
2.3.4 L'excès en sélénium.....	67
2.4 Seuils de carence et de toxicité d'oligo-éléments pour les bovins adultes.....	68
3 L'évaluation du statut en oligo-éléments en élevage bovin.....	68

3.1 L'évaluation du statut des animaux	68
3.1.1 Les prélèvements sur les bovins	69
3.1.1.1 Les prélèvements sanguins.....	69
3.1.1.2 Autres matrices pour l'évaluation du statut en oligo-éléments	70
3.1.2 Le choix des animaux.....	72
3.1.3 Les conditions pré-analytiques et de conservation des échantillons	73
3.1.4 Les méthodes de dosage des oligo-éléments dans le sang	74
3.1.5 Signification biologique des paramètres mesurés et interprétation des résultats	76
3.1.5.1 Le cuivre.....	76
3.1.5.2 Le zinc	77
3.1.5.3 L'iode	77
3.1.5.4 Le sélénium	78
3.2 Le dosage des oligo-éléments dans les fourrages d'herbe.....	80
3.2.1 Le prélèvement des fourrages	80
3.2.2 Les méthodes de dosage des oligo-éléments dans les fourrages.....	81
3.2.3 Les difficultés d'interprétation.....	81
4 Les oligo-éléments au sein du continuum sol-plante-animal permettent-ils de couvrir les besoins des bovins ?.....	83
4.1 La teneur en oligo-éléments dans les fourrages.....	83
4.2 Les facteurs de variation de la teneur en oligo-éléments dans les plantes	84
4.2.1 La richesse du sol en minéraux	84
4.2.2 Les facteurs influençant la biodisponibilité des oligo-éléments du sol pour les plantes	85
4.2.2.1 L'effet du pH sur l'absorption des plantes	86
4.2.2.2 La teneur en matière organique et en argile du sol	87
4.2.2.3 L'humidité et l'aération du sol.....	88
4.2.2.4 Les interactions entre les éléments du sol	88
4.2.3 Les facteurs de variation de la teneur en oligo-éléments dans les fourrages	89
4.2.3.1 Les familles botaniques	89
4.2.3.2 Les organes végétatifs	91
4.2.3.3 Les stades et cycles de végétation	91

4.2.3.4	Le stade de récolte et les techniques de transformation et de conservation des fourrages.....	93
4.2.3.5	La situation géographique	94
4.2.3.6	Les amendements	94
4.3	La complémentation en oligo-éléments, essentielle pour la santé des bovins.....	98
4.3.1	La réglementation européenne	98
4.3.2	Les sources spécifiques autorisées.....	99
4.3.3	Les différentes formes de distribution disponible	101
4.3.4	La complémentation minérale au pâturage	102
PARTIE 2	: ETUDE EXPERIMENTALE – EVALUATION DU STATUT EN OLIGO-ELEMENTS CHEZ DES BOVINS ALLAITANTS EN SYSTEME HERBAGER	105
1	Contexte et objectifs de l'étude expérimentale.....	107
2	Matériel et méthode.....	108
2.1	Présentation de l'exploitation agricole	108
2.2	Les animaux.....	109
2.2.1	Sélection des animaux	109
2.2.2	Introduction des animaux dans le protocole	110
2.2.3	Alimentation et complémentation des animaux	110
2.3	Prélèvements et analyses	112
2.3.1	Suivi des animaux	112
2.3.1.1	Mesure du cuivre et du zinc plasmatique	112
2.3.1.2	Dosage de l'activité de la glutathion peroxydase érythrocytaire	113
2.3.1.3	Dosage de l'iode inorganique plasmatique	113
2.3.2	Suivi de la ration à base de fourrage et des parcelles de pâturage	113
2.3.2.1	Prélèvements et analyses des foins	113
2.3.2.2	Prélèvements et analyses de l'herbe des parcelles	113
2.3.2.3	Analyses de laboratoire de la ration	114
2.4	Les analyses de données.....	114
3	Résultats	116
3.1	La teneur en minéraux des foins et l'estimation des apports	116
3.1.1	La ration de fin de saison de pâturage	116

3.1.2	La ration pendant la stabulation	116
3.1.3	La ration au pâturage de printemps.....	117
3.2	Le statut en oligo-éléments des mères	118
3.2.1	Le statut en cuivre des mères	118
3.2.2	Le statut en zinc des mères.....	119
3.2.3	Le statut en sélénium des mères	120
3.2.4	La note d'état corporel et de remplissage du rumen des mères.....	120
3.3	Le statut en oligo-éléments des veaux.....	121
3.3.1	Les effets des facteurs sur les teneurs en oligo-éléments des veaux.....	122
3.3.2	L'état de santé des veaux	122
3.4	La relation entre le statut de la mère et du veau	123
4	Discussion	125
4.1	La teneur en oligo-éléments dans les rations.....	125
4.2	La relation entre le statut en oligo-éléments des mères et de leur veau	126
4.2.1	Le statut en cuivre	126
4.2.2	Le statut en zinc	126
4.2.3	Le statut en sélénium	127
4.3	Quelques aspects technico-économiques	128
	CONCLUSION.....	129
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	133
	ANNEXES	152

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les principales enzymes cupro-dépendantes et leurs rôles biochimiques (Meschy 2017; Rollin 2002; Suttle 2010).....	29
Tableau 2 : Apports journaliers recommandés en oligo-éléments (en mg/kg ou ppm de MS de la ration) pour les bovins allaitants (INRA 1988; Meschy 2017; NRC 1996; Puls 1988)	39
Tableau 3 : Teneurs en oligo-éléments du colostrum et du lait de vache, et effets de l'apport de compléments pendant la gestation (Enjalbert 2009a).....	44
Tableau 4 : Recommandations en oligo-éléments (mg/kg de MS) pour les vaches laitières au péripartum (INRA 1988; Enjalbert 2009b).....	48
Tableau 5 : Principaux facteurs défavorables au métabolisme des oligo-éléments (Lamand 1991; Meschy 2017; Spears 2003; NRC 2001; Lamand et al. 1979)	49
Tableau 6 : Les manifestations cliniques communes lors de poly-carences en oligo-éléments (Coïc, Coppenet 1989)	64
Tableau 7 : Signes cliniques lors d'intoxication au cuivre chez les ruminants (Neirinck, Pouliquen 2007)	64
Tableau 8 : Signes cliniques et lésions lors d'intoxication au zinc chez les ruminants (Neirinck, Pouliquen 2007)	66
Tableau 9 : Traitement de l'intoxication aiguë au zinc chez les ruminants (Neirinck, Pouliquen 2007)	66
Tableau 10 : Signes cliniques lors d'intoxication au sélénium chez les ruminants (Neirinck, Pouliquen 2007)	67
Tableau 11 : Apport journalier recommandé, seuils de carence et de toxicité et teneurs maximales autorisées en cuivre, zinc, iode et sélénium pour les bovins adultes (en mg/kg de MS de la ration) (INRA 1988; Meschy 2007; Règlement (CE) n° 1831/2003 ; Règlement (CE) n° 1459/2005).....	68
Tableau 12 : Autres matrices prélevées chez les bovins pour l'évaluation du statut en oligo-éléments	71
Tableau 13 : Valeurs de référence de carence et de toxicité pour les bovins adultes proposées dans la littérature (¹ SODe : Superoxyde dismutase érythrocytaire ; ² GSH-pxe : glutathion-peroxydase érythrocytaire ; ³ IIP : teneur plasmatique en iode inorganique ; ⁴ T4 : thyroxine ; ⁵ SAA : spectrométrie d'absorption atomique) (Enjalbert, Lebreton, Salat 2006; Puls 1988; Guyot 2013).....	75
Tableau 14 : Intervalles de référence pour les concentrations physiologiques d'oligo-éléments chez les bovins dans le sérum et le sang total et pour la teneur plasmatique en iode inorganique chez les bovins adultes (Herdt, Hoff 2011)	76
Tableau 15 : Teneurs en métaux dans les roches mères en mg/kg de roche (Mench 1991; Reid, Horvath 1980).....	84

Tableau 16 : Teneurs moyennes et assimilables des sols en oligo-éléments (en mg/kg de MS de sol), sols à risque de faible disponibilité et les conditions aggravantes (Martin 2007; Coïc, Coppenet 1989).....	88
Tableau 17 : Influence de la composition et des caractéristiques physicochimiques des sols sur la disponibilité des oligo-éléments (Martin 2007)	89
Tableau 18 : Influence de la famille, de l'espèce et du cultivar sur les teneurs en oligo-éléments des fourrages de prairies naturelles (en mg/kg de MS) et de cultures (Martin 2007; Darch et al. 2020; Coïc, Coppenet 1989)	90
Tableau 19 : Teneur en oligo-éléments au cours de la saison de pâturage en régions océaniques françaises (Coïc, Coppenet 1989)	93
Tableau 20 : Apports journaliers recommandés, seuils de carence pour les bovins adultes et gamme de concentration dans les fourrages pour le cuivre, le zinc, l'iode et le sélénium (en mg/kg de MS) (INRA 1988; Bellanger 1971; Enjalbert 2009b)	96
Tableau 21 : Teneur maximale réglementaire en oligo-éléments dans les aliments pour les ruminants (concentrés, aliment minéral vitaminé, bolus, pierre à lécher, solution buvable...) (en mg de substance active/kg d'aliment complet ayant une teneur en humidité de 12 %) (Règlement (CE) n° 1831/2003 ; Règlement (CE) n°1459/2005)	98
Tableau 22 : Sources minérales et organiques des oligo-éléments (Meschy 2017; Harvey, Cooke, Marques 2021 ; Règlement (CE) n° 1831/2003).....	99
Tableau 23 : Les formes de complémentation des oligo-éléments aux bovins (Pin 2007) ...	101
Tableau 24 : Concentration minimale d'oligo-éléments nécessaire pour un AMV pâturage en seau consommé à hauteur de 100 g/j/bovin (en mg/kg) (Rousseau 2009)	103
Tableau 25 : Bilan initial (T0) des vaches retenues pour notre essai pour la cuprémie, la zincémie, la note d'état corporel (NEC) et la note de remplissage du rumen (NRR) (moyenne +/- écart-type)	110
Tableau 26 : Rations distribuées aux vaches durant les différentes périodes, calculées avec le logiciel « Larelev » (Enjalbert 1991)	111
Tableau 27 : Estimation des apports en oligo-éléments, en calcium et en magnésium de la ration avant l'entrée en stabulation	116
Tableau 28 : Estimation des apports en oligo-éléments, en calcium et en magnésium de la ration distribuée en stabulation	117
Tableau 29 : Estimation des apports en oligo-éléments, en calcium et en magnésium de la ration de début de lactation à l'herbe.....	117
Tableau 30 : Cuprémie, zincémie et activité enzymatique de la glutathion peroxydase des mères suivant les stades physiologiques (moyenne +/- écart-type)	118
Tableau 31 : Cuprémie, zincémie et activité enzymatique de la glutathion peroxydase des veaux prélevés en début de lactation (moyenne +/- écart-type).....	121
Tableau 32 : Niveau de significativité des effets des facteurs testés chez les veaux.....	122

Tableau 33 : Concentration en oligo-éléments des mères en fin de gestation pour le cuivre et en début de lactation pour le zinc et la GSH-pxe et concentration en oligo-éléments des veaux en début de lactation (moyenne +/- écart-type)123

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Métabolisme du cuivre, du zinc et du sélénium dans l'organisme des bovins (d'après Pin 2007) Cu : cuivre, Zn : zinc, Se : sélénium, GSH-px : glutathion peroxydase	34
Figure 2 : Métabolisme de l'iode dans l'organisme des bovins (d'après Pin 2007) I : iode, T4 : thyroxine, T3 : triiodothyronine, TSH : thyroid-stimulating hormone, TRH : thyrotropin-releasing hormone	37
Figure 3 : Détermination des besoins en oligo-éléments selon la méthode dose-réponse (Meschy 2017).....	38
Figure 4 : Influence des vitamines et des oligo-éléments sur la qualité du colostrum (Chantreau, Amiot 2021)	45
Figure 5 : Schéma théorique des changements des principaux aspects physiologiques des sujets sains pendant la période de transition. Idéalement, le bilan énergétique négatif (NEB), l'inflammation et le stress oxydant seraient proches de zéro (c'est-à-dire absence des phénomènes), alors que l'immunocompétence et la calcémie seraient proches de 100 % de leur niveau optimal (Trevisi, Minuti 2018)	46
Figure 6 : Evolution des substances oxydantes (ROMt) et de la capacité de désactivation des radicaux oxydants (ORAC) chez des vaches laitières en péripartum (Osorio et al. 2016)	46
Figure 7 : Concentration plasmatique moyenne en zinc (+/- écarts-types) chez 18 vaches pendant la période périnatale. La concentration de zinc de base (moyenne des jours 14, 10 et 7 avant la parturition) est de 0,86 +/- 0,05 µg/ml plasma. Les différences ^{a,b,c} avec la concentration de base sont respectivement de P < 0,05, P < 0,01 et P < 0,001 (Goff, Stabel 1990)	47
Figure 8 : Concentrations sériques de zinc (Zn) et de cuivre (Cu) (µmol/L) dans des échantillons de sang prélevés un mois avant le vêlage prévu (-1), à la mise bas (0) et un mois après le vêlage (+1) de 10 vaches laitières. Les valeurs avec des lettres différentes dans chaque paramètre diffèrent significativement (P < 0,05) (Meglia et al. 2001)	48
Figure 9 : Interactions entre cuivre, soufre et molybdène (Meschy 2017).....	51
Figure 10 : Synthèse des thiomolybdates (Lamand 1991)	51
Figure 11 : Progression des manifestations de carence (Meschy 2017).....	52
Figure 12 : La séquence des changements biochimiques conduisant à l'apparition de signes cliniques de carence en cuivre (Suttle 2010)	53
Figure 13 : Décoloration des poils péri-oculaires ("lunettes") (Lamand 1976)	54
Figure 14 : Décoloration des poils sur une Prim'Holstein (Lamand 1976)	54
Figure 15 : Hypertrophie des boulets chez un veau (W.Blower, Weaver 2006)	54
Figure 16 : Alopécie chez un veau de race Normande, âgé de 1 mois, carencé en zinc (Lamand 1976)	57
Figure 17 : Veau myopathique (attitude voussée et rassemblée caractéristique) (Lamand 1966).....	61

Figure 18 : Lésions cardiaques causées par une carence en sélénium/vitamine E sur le cœur d'un veau de 2 mois en coupe transverse présentant des foyers de nécrose blanchâtre du muscle cardiaque au niveau du septum et du ventricule gauche (Francoz, Nichols, Schelcher 2017)	62
Figure 19 : Tube héparinate de lithium Vacutainer® (www.franceneir.com)	69
Figure 20 : Tube d'héparinate de lithium oligo-éléments à billes de type Sarstedt Monovette® (www.synlab.ch)	69
Figure 21 : Les réserves en oligo-éléments du sol (Martin 2007).....	85
Figure 22 : Schéma d'assimilabilité des éléments nutritifs par les végétaux en fonction du pH du sol (Genot et al. 2009)	86
Figure 23 : Evolution de la teneur en cuivre et en zinc du Dactyle en fonction de l'âge de la plante (Martin 2007 d'après Amboulou, Lamand 1977)	91
Figure 24 : Modèle proposé de la teneur en cuivre (en mg/kg de MS) de l'herbage non conservé.....	92
Figure 25 : Relation entre la quantité de sélénium appliquée par fertilisation (g Se/ha avec du sélénate de sodium) et la teneur en sélénium fourragère observée (g Se/kg de MS). (Wallace et al. 2017)	95
Figure 26 : Facteurs de variation de la teneur en oligo-éléments dans le continuum sol-plante-bovin	97
Figure 27 : Les 5 principes agroécologiques en élevage selon (Dumont et al. 2013).....	107
Figure 28 : Evolution de la concentration plasmatique moyenne en cuivre (+/- écarts-types) chez les mères en fonction des stades de production. a, b et c représentent une différence significative de P < 0,01. Les seuils sont tirés de l'article de Enjalbert, Alves de Oliveira et Lebreton (2009).....	119
Figure 29 : Evolution de la concentration plasmatique moyenne en zinc (+/- écarts-types) chez les mères en fonction des stades de production. a et b représentent une différence significative de P < 0,001. Les seuils sont tirés de l'article de Enjalbert, Alves de Oliveira et Lebreton (2009).....	119
Figure 30 : Evolution de l'activité enzymatique moyenne de la glutathion peroxydase érythrocytaire (+/- écarts-types) chez les mères en fonction des stades de production. Les seuils sont tirés de l'article de Enjalbert, Alves de Oliveira et Lebreton (2009).....	120
Figure 31 : Notes d'état corporel (NEC) moyennes des mères réparties selon les races en fonction des stades physiologiques	121
Figure 32 : Concentration plasmatique en cuivre des mères en fin de gestation en fonction du statut des veaux $[Cu]_{\text{mère}} = -1,731 \times [Cu]_{\text{veau}} + 35,14$ ($R^2 = 0,466$; $P = 0,09$ et $\text{cor} = -0,683$)	123
Figure 33 : Concentration plasmatique en zinc des mères en début de lactation en fonction du statut des veaux $[Zn]_{\text{mère}} = 1,106 \times [Zn]_{\text{veau}} + 1,046$ ($R^2 = 0,636$; $P = 0,01$; $\text{cor} = 0,798$)	124

Figure 34 : Activité enzymatique de la glutathion peroxydase des mères en début de lactation en fonction de celle des veaux $GSH\text{-pxe (mère)} = 0,813 \times GSH\text{-pxe (veau)} + 62,42$ ($R^2 = 0,558$; $P = 0,02$; $cor = 0,747$)124

LISTE DES ABREVIATIONS

µg : microgramme	I : iode	O₂[°] : anion peroxyde
µmol : micromole	ICP-AES : spectrométrie d'émission optique (AES) couplée à un plasma induit par haute fréquence	OE : oligo-élément
ADN : acide désoxyribonucléique	ICP-MS : spectrométrie de masse (MS) couplée à un plasma induit par haute fréquence	ORAC : capacité de désactivation des radicaux oxydants
AMV : aliment minéral vitaminé	Ig : immunoglobulines	P : phosphore
ARN : acide ribonucléique	IgG, IgM : immunoglobulines G et M	PDI : protéines digestibles dans l'intestin grêle
BPR : balproRu	IIP : iode inorganique plasmatique	ppm : partie par million (équivalent au mg/kg de MS)
Ca : calcium	IM : intramusculaire	PV : poids vif
CB : cellulose brute	IV : intraveineuse	ROMt : substances oxydantes totales
cm : centimètre	IVV : intervalle vêlage-vêlage	ROS : reactive oxygen species
CMV : concentré minéral et vitaminique	kg : kilogramme	S : soufre
CRIP : protéine riche en cystine	L : litre	SAA : spectrométrie d'absorption atomique
Cu : cuivre	NEB : bilan énergétique négatif	Se : sélénium
DL : début de lactation	NEC : note d'état corporel	SOD : superoxyde dismutase
EDDI : éthylène diamine dihydroiodure	ng : nanogramme	SODE : superoxyde dismutase érythrocytaire
EOA : espèces oxygénées activées	nmol : nanomole	TRH : thyrotropin-releasing hormone
FG : fin de gestation	NRR : note de remplissage du rumen	TSH : thyroid-stimulating hormone
Fe : fer	MAT : matière azotée totale	T1 et T2 : résidus tyrosyl
g : gramme	Mg : magnésium	T3 : triiodothyronine
G : gauge	mg : milligramme	T4 : thyroxine
GAEC : groupement agricole d'exploitation en commun	mg/kg de MS : milligramme par kilogramme de matière sèche (équivalent au ppm)	U : unité
GH : hormone de croissance	mL : millilitre	UFL : Unité fourragère laitière
GSH-px : glutathion peroxydase	Mm : matière minérale	UI : unité internationale
GSH-pxe : glutathion peroxydase érythrocytaire	Mn : manganèse	VH : vache
H₂O₂ : peroxyde d'hydrogène	Mo : molybdène	Zn : zinc
h : heure	MR : mise à la reproduction	
ha : hectare		
Hb : hémoglobine		
j : jour		

INTRODUCTION

Les oligo-éléments sont des éléments présents dans l'organisme en très faible quantité (en ppm). Les apports journaliers recommandés dans les rations des bovins sont de l'ordre du milligramme par kilogramme de matière sèche. Les oligo-éléments sont indispensables au bon fonctionnement du métabolisme et essentiels pour les mécanismes physiologiques des animaux.

Chez les ruminants, 7 oligo-éléments présentent un intérêt nutritionnel essentiel pour maintenir l'intégrité fonctionnelle et structurelle des tissus. Ils permettent également d'assurer une croissance, une santé et une productivité optimales. Ces éléments traces essentiels sont le cuivre, le zinc, le sélénium, l'iode, le cobalt, le manganèse et le fer (INRA 2018; Meschy 2017; Suttle 2010).

Cette étude se concentrera sur les quatre micronutriments les plus carencés chez les bovins en Europe (Guyot et al. 2009) : le cuivre, le zinc, le sélénium et l'iode. Leurs rôles et leurs impacts sur la santé du jeune et de l'adulte et sur les performances, notamment en termes de reproduction, semblent être les plus importants (Lequeux 2016).

À l'heure actuelle, l'amélioration des performances des animaux demande aux éleveurs une rigueur technique notamment dans l'alimentation. Dans un contexte de développement des systèmes d'exploitation agricoles durables, viables, autonomes et respectueux de l'environnement, la valorisation des systèmes herbagers est indispensable. Avec pour objectif d'une autonomie alimentaire, de plus en plus d'élevages bovins français modifient leur manière de travailler pour produire leur propre fourrage. Le pâturage représente plus de 50 % de la ration fourragère chez les bovins allaitants. (Institut de l'élevage 2018). Il permet également de garder des paysages ouverts. Or, l'alimentation à base de fourrage est pauvre en oligo-éléments. Les premières études sur le déficit en oligo-éléments chez les bovins remontent aux années 1970. Ainsi, Lamand et Périgaud (1973) observent que les foins produits sur le territoire français sont carencés en cuivre, zinc, sélénium et souvent déficitaires en iode. Ces carences vont conduire à des troubles de la santé des troupeaux qui peuvent évoluer à bas bruit mais également provoquer des signes cliniques en cas de carences sévères. Une supplémentation en minéraux est alors indispensable pour couvrir les besoins des animaux et leur permettre d'exprimer leur performance de manière optimale. Un équilibre doit être trouvé entre bien-être/santé animale et réduction des risques de rejets d'éléments polluants pour l'environnement. L'évaluation de la qualité des fourrages en parallèle de la réalisation de profil métabolique permet d'avoir une image précise sur les statuts en oligo-éléments dans les élevages et d'adapter la complémentation minérale en fonction des ressources herbagères disponibles.

La première partie synthétise les connaissances sur les rôles et le métabolisme des oligo-éléments chez les bovins pour comprendre les signes cliniques liés aux carences et plus rarement aux excès. Ensuite, nous allons voir comment évaluer le statut en oligo-éléments des troupeaux bovins et comprendre pourquoi les fourrages à base d'herbe sont déficitaires

en oligo-éléments et en la nécessité d'une complémentation minérale réfléchie. La deuxième partie présente l'étude expérimentale réalisée dans d'un élevage bovin allaitant valorisant leur système herbager. L'objectif est d'évaluer le statut en cuivre, zinc, iode et sélénium chez des vaches multipares, autour de la mise-bas, alimentées exclusivement avec des fourrages d'herbe.

PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1 Les oligo-éléments chez les bovins

1.1 Les principaux rôles biochimiques et physiologiques des oligo-éléments chez les bovins

Les oligo-éléments contribuent à la réalisation des fonctions vitales en tant que catalyseurs des systèmes enzymatiques ou composants indispensables des molécules essentielles comme certaines hormones et vitamines. Elles régulent également la réplication et la différenciation cellulaire (Meschy 2017). Ainsi, les oligo-éléments participent à de nombreuses chaînes métaboliques indispensables à la vie cellulaire (Dumon 2007). En particulier, le cuivre, le zinc, l'iode et le sélénium sont les principaux oligo-éléments indispensables au bon fonctionnement du système immunitaire chez les bovins (Lequeux 2016; Meschy 2017; Gilles et al 2009).

Les principaux rôles biologiques sont rappelés dans cette partie afin de comprendre les signes cliniques observés lors de carences et plus exceptionnellement lors d'excès chez les bovins.

1.1.1 Le cuivre

Chez les bovins adultes, le cuivre (Cu) est présent principalement dans les tissus osseux, les muscles, le compartiment sanguin et le foie. Ce dernier joue le rôle d'organe de réserve. Ainsi, l'organisme des ruminants dispose de 2 mg de cuivre par kilogramme de poids vif. Il est un composant, cofacteur et activateur de nombreux systèmes enzymatiques (INRA 2018; Meschy 2017). Il existe 12 cupro-enzymes dont les principales sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Les principales enzymes cupro-dépendantes et leurs rôles biochimiques (Meschy 2017; Rollin 2002; Suttle 2010)

Enzymes	Principales fonctions	Systèmes ou compartiments de l'organisme impliqués
Céruloplasmine (ferroxydase)	Oxydation du fer ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$) et transport du fer Hématopoïèse Transport du cuivre Enzyme anti-oxydante	Compartiment sanguin Système antioxydant et défense immunitaire
Cytochrome C oxydase	Transport d'électrons terminaux dans la chaîne respiratoire mitochondriale	Toutes les cellules de l'organisme
Dopamine mono-oxydase	Synthèse des catécholamines	Système nerveux (cerveau)
Galactosylméthyltransférèse	Synthèse de la myéline	Système nerveux
Lysyloxydase	Synthèse du collagène et de l'élastine	Systèmes cardiovasculaire et osseux, tissus pulmonaires
Superoxyde dismutase	Enzyme anti-oxydante	Système antioxydant et défense immunitaire
Thioloxydase	Synthèse de la kératine	Poils, ongles, mamelle
Tyrosinase	Synthèse de la mélanine	Coloration des poils

Santé et immunité

Le cuivre est un composant essentiel de deux enzymes importantes pour le système immunitaire : la superoxyde dismutase (SOD) et la céruloplasmine. Il est, avec le zinc, cofacteur de la SOD. Cette enzyme fait partie intégrante des systèmes antioxydants dont le rôle est de lutter contre le stress oxydant (Lequeux 2016; Siliart 2007). Par définition, le stress oxydant « résulte d'un déséquilibre entre les substances pro-oxydantes produites par le métabolisme et les capacités de défense anti-oxydantes de l'organisme » (Lequeux 2016). Physiologiquement, les substances pro-oxydantes, également appelées espèces oxygénées activées (EOA ou ROS en anglais) sont produites à partir de toutes réactions auxquelles l'oxygène participe (production d'énergie, synthèse de molécules essentielles ou encore lutte contre les pathogènes). Chez un animal sain, la production des EOA est parfaitement régulée. Cependant, en cas de pathologie (par exemple, activation des cellules inflammatoires ou encore perfusion brutale des tissus en anoxie après le relevé d'une vache couchée), on observe une production excessive d'EOA. Elles sont alors susceptibles de déstabiliser toutes les molécules riches en doubles liaisons (acides gras polyinsaturés des membranes et des lipoprotéines, les vitamines et les acides nucléiques) et de provoquer des dommages cellulaires et tissulaires. Les systèmes antioxydants permettent de lutter contre l'accumulation toxique des EOA et de protéger l'intégrité cellulaire. Ainsi, lorsque les systèmes antioxydants sont insuffisants, la concentration cellulaire et extracellulaire des EOA augmentent provoquant alors un stress oxydant pouvant aller jusqu'à la mort de l'animal (Siliart 2007). Les cellules immunitaires sont les plus sensibles à ce stress oxydant, notamment les cellules inflammatoires (monocytes, macrophages, polynucléaires neutrophiles) qui, lors de leur activation contre les agents pathogènes, vont produire massivement des EOA (Lequeux 2016; Siliart 2007; Suttle 2010). La SOD est le premier système de défense en cas de stress oxydant brusque ou massif. Son rôle est de réduire l'anion superoxyde O_2° en O_2 et H_2O_2 (Siliart 2007). Ainsi, le cuivre avec le zinc, indispensables à l'activité enzymatique de la SOD, sont des protecteurs de l'intégrité cellulaire (Meschy 2017).

Par ailleurs, la céruloplasmine est également impliquée dans les processus antioxydants. Lors de réaction inflammatoire, sa concentration sanguine augmente afin de protéger les tissus des facteurs pro-oxydants (Meschy 2017; Molmy 2018; Sordillo 2016). La céruloplasmine est une ferroxidase qui peut oxyder le fer ferreux (Fe^{2+}), capable de générer des radicaux libres toxiques, en fer ferrique (Fe^{3+}) non toxique pour les cellules (Wiggins et al. 2006). Indépendamment de cette activité oxydase, elle absorbe les radicaux peroxydes (Atanasiu et al. 1998). La céruloplasmine est également une protéine de transport du cuivre. Il a été démontré, chez les vaches laitières, que la concentration plasmatique en cuivre augmente lors de la phase aiguë de l'inflammation (Yatoo et al. 2013).

1.1.2 Le zinc

L'organisme des bovins adultes contient environ 30 mg de zinc (Zn) par kilogramme de poids vif. Il est présent dans tous les tissus et principalement dans la peau et les phanères mais également dans les os et les muscles. Tout comme le cuivre, le zinc est un composant et un cofacteur de très nombreuses enzymes (plus de 200) : SOD (système antioxydant), anhydrase carbonique (cycle du CO₂), ADN polymérase (division cellulaire), ARN polymérase (synthèse protéique), collagénase (métabolisme osseux et cartilagineux)... . Les rôles du zinc sont ainsi multiples et complexes. Il va intervenir dans de nombreuses fonctions métaboliques, immunitaires et hormonales (INRA 2018; Meschy 2017; Rollin 2002) :

- Lutte contre le stress oxydant (SOD) ;
- Métabolisme des glucides, lipides, protéines, acides nucléiques (ADN et ARN), et de la vitamine A ;
- Protection des membranes cellulaires : inhibition de la peroxydation des acides-gras des phospholipides membranaires ;
- Immunité cellulaire et humorale ;
- Synthèse des hormones : insuline, GH, testostérone ;
- Formation de la kératine... .

Santé et immunité

Le zinc est très important pour la fonction immunitaire (Yatoo et al. 2013). En tant que cofacteur de la SOD et activateur de la synthèse de métallothionéine, protéine diminuant les radicaux libres, il joue un rôle dans la lutte contre le stress oxydant (Siliart 2007). Il participe à la stabilité des membranes cellulaires et prévient les lésions causées par les EOA au cours des processus inflammatoires (Libera et al. 2021).

De plus, en tant que composant de la thymuline, une hormone produite dans le thymus, il intervient dans la maturation des lymphocytes B et T (Lequeux 2016; NRC 2001). Il permet également le développement et le fonctionnement des cellules médiatrices de l'immunité innée notamment des neutrophiles et leur activité phagocytaire (Lequeux 2016; Libera et al. 2021).

Enfin, contrairement au cuivre, la concentration plasmatique en zinc diminue lors de la phase aiguë de l'inflammation du fait de l'augmentation de son utilisation par les cellules (Siliart 2007; Yatoo et al. 2013).

1.1.3 L'iode

La teneur en iode (I) de l'organisme du bovin adulte est d'environ 0,4 mg/kg PV. 70 à 80 % de l'iode se localise dans la glande thyroïde. Le reste se répartit majoritairement dans les muscles, le foie et les ovaires (Meschy 2017).

L'unique rôle connu de l'iode est d'être le constituant minéral des deux hormones thyroïdiennes : la tétraïodothyronine (thyroxine ou T4) et la triiodothyronine (T3). Il participe au métabolisme basal, au mécanisme de la thermorégulation, à la régulation du métabolisme des glucides, des lipides et des protéines, à la régulation des mécanismes d'oxydation cellulaire, au système immunitaire, à la croissance osseuse et cartilagineuse, au développement musculaire, à la reproduction (fonction ovarienne et synthèse des hormones) et au développement du fœtus (cerveau, cœur et poumons) (Meschy 2017; Pin 2007).

L'iode, sous forme d'iodure activé par la thyroperoxydase (enzyme à sélénium) est associé à l'acide aminé tyrosine de la thyroglobuline pour former les résidus tyrosyl (T1 et T2). Dans la glande thyroïde, les résidus T2 sont condensés pour former la thyroxine (T4), forme de transport inactive de l'hormone. Enfin, la T4 est convertie en T3 dans le foie sous l'activation d'enzymes sélénodépendantes, les 5'-désiodases. La T3 est l'hormone thyroïdienne active qui sera formée en fonction des besoins de l'organisme. Le sélénium est donc nécessaire au métabolisme de l'iode (McDonald et al. 2011; Meschy 2017; Pin 2007).

1.1.4 Le sélénium

Le sélénium (Se) est un oligo-élément présent dans toutes les cellules de l'organisme. La teneur en sélénium chez le bovin adulte est d'environ 0,2 mg/kg PV et se concentre principalement dans les reins et le foie. Il est le constituant de nombreuses enzymes dont les glutathion peroxydases (au nombre de 4), les désiodases, les réductases et la sélénophosphate synthétase. Ainsi, le sélénium est impliqué dans de nombreuses fonctions physiologiques (Meschy 2017; Rollin 2002) :

- Immunité et lutte contre le stress oxydant musculaire : en synergie avec la vitamine E, les glutathion peroxydases, enzymes présents dans le plasma, les globules rouges, les muscles, le foie et les reins (Rollin 2002), jouent un rôle antioxydant essentiel en détruisant l' H_2O_2 (produit lors de la réduction de l'oxygène) et en réduisant les hydroperoxydes phospholipides membranaire. Les thioredoxines réductases jouent également un rôle d'antioxydant (Yatoo et al. 2013; Spears, Weiss 2008) ;
- Processus inflammatoire : amélioration de la phagocytose des neutrophiles et prolifération lymphocytaire (Rollin 2002; Yatoo et al. 2013) ; amélioration de la migration des neutrophiles et des macrophages (Vlasova, Saif 2021) ;
- Métabolisme de l'iode : par le biais des désiodases, il permet la conversion de la thyroxine (T4) en triiodothyronine (T3) active et intervient ainsi indirectement dans les principaux systèmes métaboliques ;

De par l'implication très large des sélénoprotéines dans les voies métaboliques, le sélénium est essentiel chez les bovins en termes de performance, de reproduction et de défense immunitaire (Meschy 2017).

1.2 Le métabolisme des oligo-éléments chez les bovins adultes

Les ruminants ingèrent les oligo-éléments sous forme inorganique présente plutôt dans les AMV ou les pré-mélanges (sels minéraux : sulfates, chlorures, oxydes, carbonates, acétates et phosphates ou associés à du calcium ou du sodium) ou sous forme organique présente plutôt dans les matières premières (chélatés à des glucides et surtout à des acides aminés). Au niveau de la muqueuse du rumen, du duodénum et du jéjunum, ils sont complexés avec des acides-aminés pour être absorbés sous forme de métalloprotéines. Ils sont distribués par la circulation sanguine pour rejoindre le foie où ils seront métabolisés sous forme de métalloenzymes avant d'être transportés jusqu'aux organes cibles (Meschy 2017; Pin 2007).

1.2.1 Absorption, transport et stockage du cuivre

Le cuivre est principalement absorbé au niveau du rumen et du jéjunum. Il est absorbé soit de manière active, complexé avec des acides aminés comme l'histidine ou avec des protéines (principalement la métallothionéine), soit de manière passive, en suivant un gradient de concentration entre le tube digestif et le sang. Cette dernière ne permet pas une régulation efficace de l'absorption du cuivre et en cas d'excès alimentaire, les intoxications sont possibles. L'efficacité d'absorption diminue avec l'âge (71 % à 28 jours, 47 % avant le sevrage et 10,8 % après le sevrage (Auza 1983) et seulement 1 à 5 % chez les bovins adultes avec un rumen fonctionnel (NRC 2001)). Elle varie également selon la forme chimique (oxyde moins disponible que le sulfate ou le carbonate (Auza 1983)) mais diminue surtout avec les interactions antagonistes d'autres oligo-éléments dans le tube digestif : complexe cuivre-soufre-molybdène, excès de soufre, excès de fer et de zinc (Cf. *Tableau 5*).

Une fois dans le sang, le cuivre est transporté dans les érythrocytes et lié à l'albumine dans le plasma, pour rejoindre le foie, organe de réserve (100 à 400 mg/kg de MS dans des conditions d'alimentation adéquates (Auza 1983)) (Cf. *Figure 1*). Cet organe est essentiel à l'homéostasie du cuivre. En fonction des besoins de l'animal, le cuivre est soit stocké soit sécrété dans la bile et le sang. Dans les hépatocytes, le cuivre est incorporé à la céruloplasmine avant de rejoindre les organes cibles (peau, mamelle, utérus, système cardio-respiratoire...) par voie sanguine. La céruloplasmine représente plus de 90 % du cuivre plasmatique (Auza 1983). En cas d'excès, le cuivre peut quitter le foie par la bile. Cependant, lors d'intoxication alimentaire en cuivre, le foie n'est plus capable d'éliminer efficacement le cuivre, et ce dernier va alors s'accumuler, et provoquer des symptômes pouvant aller jusqu'à la mort de l'animal. Une quantité importante de cuivre est éliminée dans les selles et une

partie sera recyclée par le système entéro-hépatique. (Meschy 2017; Pin 2007; Suttle 2010; Auza 1983).

La quantité principale de cuivre éliminée dans les fèces correspond à la part non absorbée. Le reste est la partie endogène (dont une petite quantité est l'excrétion biliaire). Il est excrété en très faible quantité dans l'urine (2 % du cuivre absorbé) (Meschy 2017; Pin 2007). Un pourcentage variable de cuivre est éliminé par voie mammaire (Auza 1983).

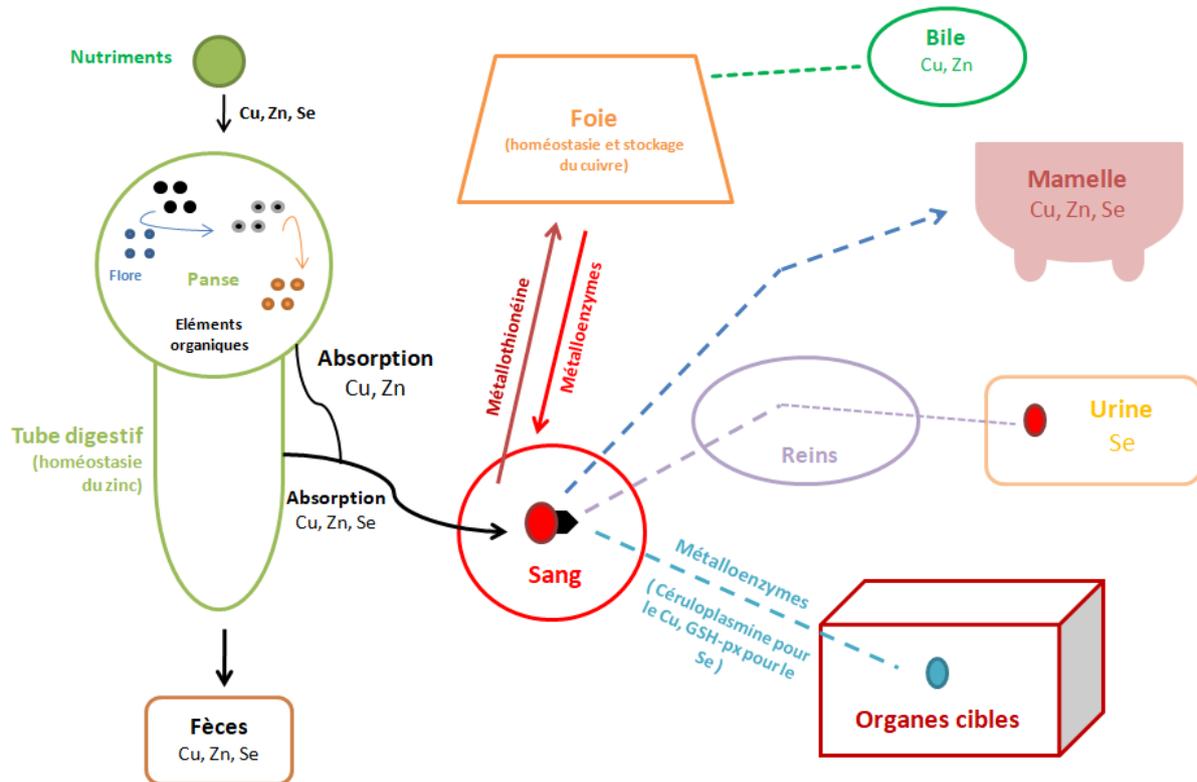


Figure 1 : Métabolisme du cuivre, du zinc et du sélénium dans l'organisme des bovins (d'après Pin 2007)
Cu : cuivre, Zn : zinc, Se : sélénium, GSH-px : glutathion peroxydase

1.2.2 Homéostasie digestive et élimination du zinc

Comme le cuivre, le zinc est absorbé au niveau du rumen et de l'intestin grêle (duodénum). Le zinc va entrer dans les entérocytes soit par le biais d'un transport actif saturable soit suivant un gradient de concentration pouvant devenir très important lors d'apport alimentaire en excès. Une fois dans les entérocytes, le zinc se fixe à différents éléments en fonction de sa concentration dans le tube digestif. Lors d'apport alimentaire carencé en zinc, celui-ci va se fixer préférentiellement à une protéine riche en cystine (CRIP), lui permettant ainsi une absorption importante vers le compartiment sanguin. Ce système permet d'améliorer l'absorption intestinale du zinc en cas de forte carence. Lors d'apport alimentaire excessif, le zinc se fixe à la métallothionéine, qui va au contraire limiter son absorption sanguine. L'absorption intestinale est alors régulée, diminuant les risques d'intoxication. Il va alors rester dans l'entérocyte et sera éliminé dans les matières fécales après la mort et la desquamation de l'entérocyte. Ainsi, chez les ruminants, l'efficacité

d'absorption diminue à mesure que la quantité de zinc alimentaire augmente (Miller 1970). Des interactions dans la lumière intestinale avec d'autres éléments tels que l'excès de soufre, l'ingestion de terre, ou encore la concurrence pour les mêmes transporteurs avec le cuivre (méthionine) peuvent également diminuer l'absorption du zinc (Meschy 2017; NRC 2001) (Cf. *Tableau 5*).

Contrairement au cuivre, il n'existe pas de véritable organe de réserve pour le zinc. L'homéostasie est essentiellement digestive. Le zinc est libéré dans la circulation sanguine où il est transporté de manière non spécifique par la transferrine et l'albumine.

Le zinc est éliminé principalement par voie fécale (100 mg par jour pour une vache) comprenant la fraction d'origine alimentaire très variable en fonction du niveau d'apport et une fraction endogène constante via les sécrétions biliaires, pancréatiques et les cellules intestinales. Il est également éliminé dans le lait (Meschy 2017; Pin 2007) (Cf. *Figure 1*).

1.2.3 Absorption, transport et élimination du sélénium

Les bovins consomment du sélénium sous forme organique, la sélénométhionine et la sélénocystéine, obtenues principalement à partir des fourrages ou sous forme inorganique, les sélénites et les sélénates, par la supplémentation minérale. L'absorption du sélénium a lieu dans le duodénum et le cæcum. Les mécanismes d'absorption du sélénium dépendent de sa forme chimique. Le sélénite diffuse de façon passive à travers la barrière intestinale, le sélénate utilise des transports actifs (co-transport Na-sélénate ou échange sélénate-OH⁻) et les séléno-acides-aminés sont absorbés par le système de transport de ces même acide-aminés (Meschy 2017; Ullah et al. 2020). Le sélénium alimentaire inorganique est relativement peu absorbé chez les ruminants (seulement 29 % pour le sélénite chez les ovins (Wright, Bell 1966)). Cette faible efficacité d'absorption peut s'expliquer par une réduction du sélénium inorganique en séléniures insolubles dans le rumen. De plus, une partie du sélénium est utilisée par les micro-organismes du rumen, le rendant non assimilable au niveau intestinal (Meschy 2017; Suttle 2010; Spears 2003).

Dans le sang, le sélénium est lié à des protéines ou incorporé à la glutathion peroxydase (GSH-pxe) dans les hématies. Cette synthèse a également lieu dans le foie. Dans les fluides corporels et les tissus, le sélénium est présent sous forme de sélénométhionine ou de sélénocystéine. Les tissus de réserve chez les ruminants sont (dans l'ordre d'importance) : les reins, les muscles, le foie et les hématies. Le foie, les muscles striés squelettiques et le muscle cardiaque sont les plus sensibles aux carences en sélénium. Le foie est l'organe le plus important dans l'excrétion du sélénium (Meschy 2017; Pin 2007; Ullah et al. 2020).

Chez les ruminants, l'excrétion du sélénium est principalement fécale. L'élimination urinaire sera plus importante suite à un apport de sélénium sous forme de sélénite comparé à un apport de sélénométhionine. Une partie sera également éliminée dans le lait, l'haleine expirée et la sueur (Meschy 2017; Ullah et al. 2020) (Cf. *Figure 1*).

1.2.4 Absorption, stockage et homéostasie de l'iode

L'iode, comme tous les anions, est un oligo-élément avec une forte efficacité d'absorption gastro-intestinale. Sous forme principalement d'iodure, il est absorbé à plus de 80 % par le réticulo-rumen. Le feuillet va en absorber 10 % de plus. La caillette a un rôle un peu particulier dans le métabolisme de l'iode. Elle absorbe l'iode mais elle va surtout la sécréter en grande quantité dans la lumière intestinale (Miller, Swanson, Spalding 1975). L'absorption par les voies respiratoires et cutanées n'est pas négligeable. Une fois absorbé par les cellules de la muqueuse du tube digestif, l'iode est transporté dans le sang lié faiblement à des protéines plasmatiques (IIP : iode inorganique plasmatique). L'iode plasmatique représente 5 à 8 % de l'iode total dont une partie est complexée aux hormones thyroïdiennes. La concentration sanguine en iode plasmatique chez les ruminants varie de 0,4 à 5 µg/L (Meschy 2017; Pin 2007; Suttle 2010).

La régulation des besoins de l'organisme en hormone thyroïdienne dépend de l'axe hypothalamo-hypophysaire-thyroïde. La captation de l'iode par les thyrocytes est stimulée par une hormone hypophysaire, la TSH (thyroid-stimulating hormone), elle-même dépendante de la TRH (thyrotropin-releasing hormone) sécrétée par l'hypothalamus. Plus de 90 % de l'iode plasmatique est prélevé par la glande thyroïdienne. Par ailleurs, plus l'apport alimentaire est carencé en iode, plus la glande thyroïde le met en réserve. Une fois dans les thyrocytes, l'iode est stocké sous forme de thyroglobuline pendant 2 à 3 mois. À partir de cette forme de réserve et selon les besoins de l'organisme, les hormones thyroïdiennes sont synthétisées et sécrétées dans le sang pour rejoindre les organes cibles principalement sous forme de T4. Quasiment toutes les cellules de l'organisme sont capables de convertir la T4 en T3, assurant la régulation du métabolisme basal (Meschy 2017; Pin 2007; Suttle 2010). La quantité d'iode incorporée dans les hormones thyroïdiennes varie en fonction du stade physiologique : 0,4 mg/jour chez le veau de 40 kg, 1,3 mg/jour chez la génisse non gestante de 400 kg, 1,5 mg/kg en fin de gestation jusqu'à 4 à 4,5 mg/jour pour les vaches laitières hautes productrices (NRC 2001). Les besoins en iode vont également varier en fonction de la température extérieure. Miller et al (1975) ont observé que l'activité thyroïdienne était plus faible en été qu'en hiver et au printemps. Chez des génisses laitières, la sécrétion de thyroxine diminue lorsque la température extérieure se situe entre 24 et 34°C (Thompson et al. 1963). Ainsi, à partir de 24-25°C, les besoins en iode diminuent.

Contrairement au zinc et au cuivre, l'iode est majoritairement éliminé par voie urinaire. En cas d'excès d'iode dans la ration, le lait se concentre en iode et représente également une voie d'élimination. Enfin, l'iode peut également être recyclé par le cycle entéro-hépatique via la bile et les sécrétions de la caillette réabsorbées dans l'intestin grêle et le colon (Pin 2007; Suttle 2010) (Cf. Figure 2).

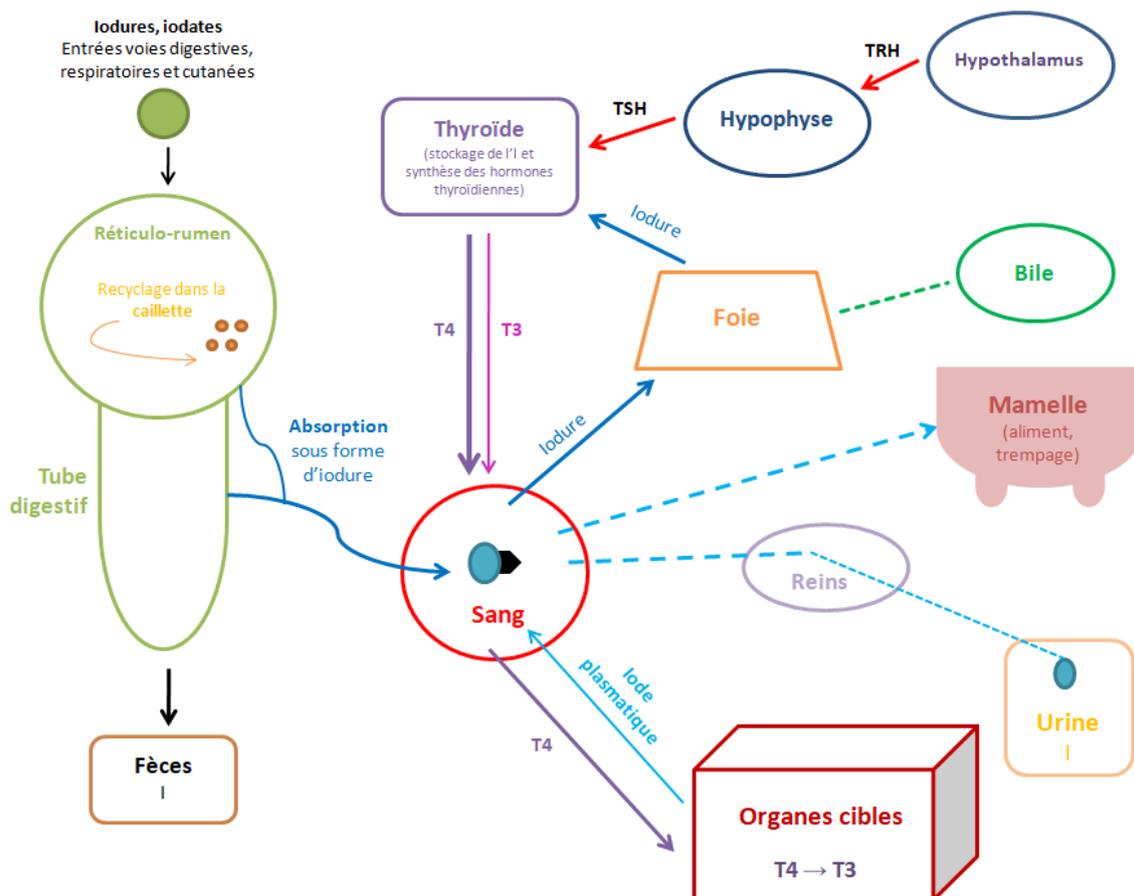


Figure 2 : Métabolisme de l'iode dans l'organisme des bovins (d'après Pin 2007)

I : iode, T4 : thyroxine, T3 : triiodothyronine, TSH : thyroid-stimulating hormone, TRH : thyrotropin-releasing hormone

2 Les besoins en oligo-éléments : étude des carences et des excès chez les bovins

2.1 Les besoins en oligo-éléments chez les bovins adultes et les veaux

2.1.1 L'estimation des besoins quotidiens en oligo-éléments

Les recommandations en termes d'apports alimentaires chez les animaux découlent directement de la détermination de leurs besoins journaliers. Ainsi, « le besoin en oligo-élément peut être défini comme la quantité nécessaire pour assurer de façon optimale l'ensemble des fonctions physiologiques » (Dumon 2007).

Actuellement, il existe deux méthodes d'estimation des besoins en oligo-éléments. La première est basée sur une démarche du type dose-réponse (Cf. Figure 3). C'est une méthode d'essai alimentaire qui consiste à étudier les modifications biologiques ou

zootechniques spécifiques d'un élément (par exemple, la concentration érythrocytaire en glutathion peroxydase pour le sélénium) en augmentant progressivement les apports de celui-ci. Un seuil de carence et de toxicité sont alors déterminés. L'apport journalier recommandé, exprimé en mg/kg de MS (ou ppm), se situe entre ces seuils en adoptant une marge de sécurité prenant en compte les variations entre animaux (stade physiologique, âge, stress, statut vis-à-vis de l'élément...) ou dans la ration (forme chimique de l'élément, interactions entre éléments présents pouvant modifier la biodisponibilité de l'élément concerné...) (Dumon 2007; Meschy 2017).

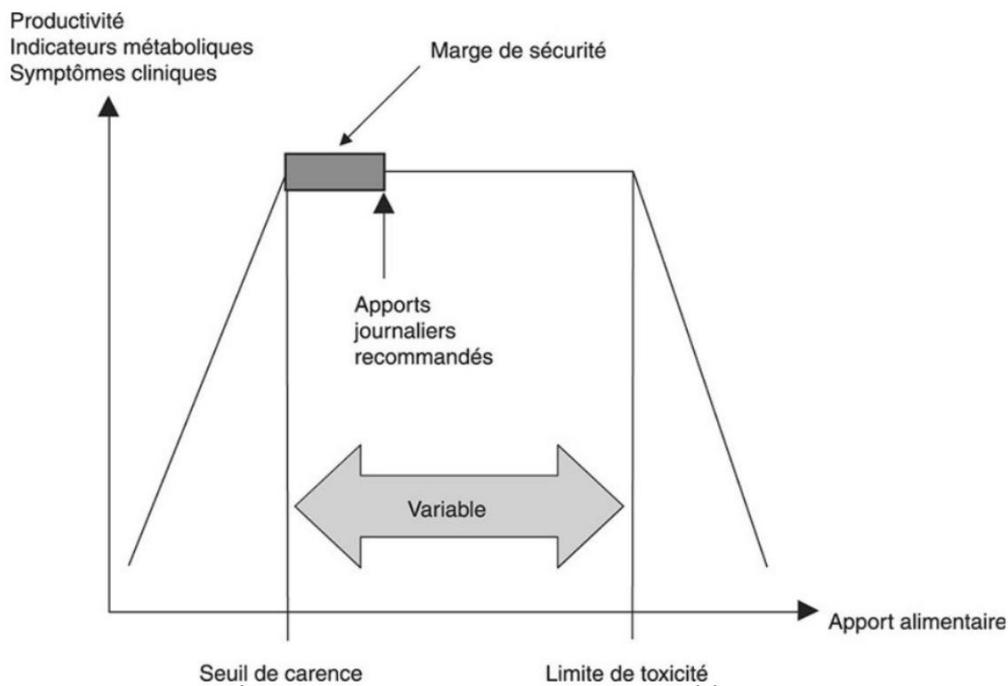


Figure 3 : Détermination des besoins en oligo-éléments selon la méthode dose-réponse (Meschy 2017)

La deuxième méthode, dite factorielle, analyse les différentes dépenses d'entretien et de production des animaux (croissance, gestation et lactation) et estime l'utilisation digestive et métabolique afin de calculer le besoin alimentaire de l'élément. Or, comme cette méthode ne prend pas en compte la dynamique des réserves de l'organisme, elle ne peut donc pas être appliquée à tous les oligo-éléments (Dumon 2007; Meschy 2017).

Ainsi, les organismes nationaux calculent les besoins en oligo-éléments selon la première et/ou la seconde méthode. En France, l'INRAe utilise la méthode dose-réponse pour tous les oligo-éléments alors qu'aux Etats-Unis, la National Research Council retient l'approche factorielle pour l'estimation des besoins en cuivre et zinc et la méthode dose-réponse pour le sélénium et l'iode. Ceux-ci peuvent expliquer en partie les variations d'estimation des apports donnés par les différents auteurs.

2.1.2 Les apports journaliers recommandés

Tableau 2 : Apports journaliers recommandés en oligo-éléments (en mg/kg ou ppm de MS de la ration) pour les bovins allaitants (INRA 1988; Meschy 2017; NRC 1996; Puls 1988)

	INRA 1988 et Meschy 2007	NRC 1996			Puls 1988	
	Bovins adultes	Veaux en croissance	Vaches gestantes	Vaches allaitantes	Bovins adultes	Veaux
Cuivre	10	10	10	10	10	-
Zinc	50	30	30	30	45	-
Iode	0,2-0,8*	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25
Sélénium	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3

* 0,8 mg d'iode par kg MS pour les vaches laitières hautes productrices

Le tableau 2 donne les quantités d'oligo-éléments à apporter au quotidien aux bovins allaitants sains, non carencés pour assurer leurs besoins (entretien, santé, production et reproduction...). La majorité des apports en minéraux sont assurés par les fourrages, constituants essentiels de l'alimentation des bovins. Selon les auteurs, les recommandations sont différentes, surtout pour le zinc. Le NRC prend en compte des recommandations définies par des études américaines dont les seuils sont plus faibles qu'en France (INRAe).

2.1.3 Les besoins physiologiques en oligo-éléments autour de la mise-bas

2.1.3.1 Le transfert des oligo-éléments de la mère au fœtus et les conséquences sur les besoins de la mère

Pour une croissance et un développement optimal, le fœtus a besoin d'oligo-éléments (Hostetler, Kincaid, Mirando 2003). Le fœtus est complètement dépendant de sa mère pour les apports en oligo-éléments essentiels : cuivre, iode, fer, manganèse, sélénium et zinc (Hidiroglou, Knipfel 1981; Hostetler, Kincaid, Mirando 2003). Un déficit en oligo-élément chez la mère entraîne un apport insuffisant pour le fœtus, pouvant contribuer à un taux élevé de mortalité embryonnaire, un défaut de croissance, des anomalies de développement du système nerveux central, du squelette et des altérations métaboliques pouvant aller jusqu'à la mort du fœtus en cas de carence très importante (Hostetler, Kincaid, Mirando 2003). La nutrition maternelle peut-être considérée comme un déterminant majeur du statut du fœtus et des jeunes veaux affectant directement leur santé. Une complémentation en oligo-éléments en péripartum est essentielle pour la mère mais également pour le fœtus et le futur nouveau-né. Par exemple, une supplémentation en sélénium, chez des vaches laitières, au cours des 2 derniers mois de gestation avec un bolus libérant 3 mg/j de sélénite de sodium permet d'augmenter les teneurs hépatiques et

sanguines en sélénium de leurs nouveau-nés à la naissance. Le statut en sélénium des veaux est également amélioré jusqu'à 6 semaines d'âge (Abdelrahman, Kincaid 1995).

Chez les bovins, certains oligo-éléments ont la capacité de passer la barrière placentaire. C'est le cas pour le sélénium (Weiss, Colenbrander, Cunningham 1984; Koller, Whitbeck, South 1984), le cuivre (Pryor 1964), le zinc (Hidiroglou 1980) et l'iode (Hidiroglou 1980; Miller, Swanson, Spalding 1975). Gooneratne et Christensen (1989a) et Abdelrahman et Kincaid (1993) ont mis en évidence que le fœtus accumule les 3 premiers minéraux cités dans ses tissus à des stades différents de la gestation. L'iode n'a pas été étudié dans ces 2 études.

a. Le cuivre

Gooneratne et Christensen (1989b) ont observé une augmentation progressive des teneurs hépatiques en cuivre chez les fœtus et une diminution de celles de leur mère au cours de la gestation. Cependant, les teneurs en cuivre des tissus du fœtus sont similaires à celles de leur mère à l'exception du tissu hépatique. Le fœtus présente des concentrations hépatiques en cuivre plus importantes que celles de sa mère (et encore plus chez le nouveau-né que chez le fœtus (Cunningham 1931)). Les concentrations moyennes en cuivre dans le foie de la mère et du fœtus sont respectivement de 164 et 430 ppm de MS (Pryor 1964). Il existe même une corrélation positive significative ($P < 0,05$) entre les teneurs hépatiques en cuivre de la mère et du fœtus. Même en cas de carence chez la mère, le fœtus sera prioritaire pour le cuivre (Gooneratne, Christensen 1989b; Xin et al. 1993; Enjalbert et al. 2002).

Chez les ruminants, le cuivre transféré de la mère au fœtus provient très probable de protéines cupriques fabriquées dans le foie de celle-ci. Cependant, plusieurs études ont montré que les concentrations en céruloplasmine chez la mère étaient supérieures à celles du fœtus. Ainsi, le cuivre passe la barrière placentaire sous forme non céruloplasmique. Le nouveau-né va développer ses capacités à synthétiser cette molécule rapidement après la mise-bas (3 jours chez les agneaux). Le fœtus et le nouveau-né ont des taux sanguins en cuivre plus faibles que leur mère (Hidiroglou, Knipfel 1981).

Après son passage transplacentaire, le cuivre se concentre dans le foie du fœtus. Le veau naît donc avec d'importante réserve en cuivre. La naissance d'un veau avec de faibles réserves en cuivre reste exceptionnelle (Enjalbert 2009a). Les besoins en cuivre du fœtus sont plus importants en fin de gestation. Cependant, un apport alimentaire suffisant en cuivre tout au long de la gestation est nécessaire pour la mère afin que son fœtus puisse le stocker correctement pour son développement intra-utérin mais également pour le début de sa vie post-partum.

b. Le zinc

En ce qui concerne le zinc, les concentrations hépatiques (environ 900 ppm) et les concentrations rénales (environ 112 ppm) ne changent significativement pas entre le 3^{ème} et 9^{ème} mois (Abdelrahman, Kincaid 1993). Cependant, d'autres auteurs n'ont pas trouvé les mêmes résultats. Gooneratne et Christensen (1989a) ont remarqué une diminution significative des concentrations hépatiques en zinc chez le fœtus après le premier trimestre de gestation puis une augmentation durant le dernier trimestre. La teneur en zinc dans le foie des fœtus est plus élevée que celle de leur mère. Enfin, la gestation n'avait aucun effet significatif sur les teneurs hépatiques en zinc des mères (Gooneratne, Christensen 1989a). Le fœtus doit donc recevoir tout au long de la gestation et de manière régulièrement du zinc par voie placentaire. De manière moins importante que le cuivre, le fœtus stocke le zinc dans son foie, nécessaire pour sa vie post-natale. Il est donc recommandé d'apporter du zinc pour couvrir les besoins de la mère tout au long de sa gestation.

c. L'iode

Le statut plasmatique en iode du nouveau-né à la naissance est conditionné par celui de sa mère durant la gestation (Austin et al. 1980). L'iode passe à travers la barrière placentaire et va s'accumuler dans le liquide amniotique, la thyroïde, l'estomac et d'autres tissus fœtaux (Miller et al. 1967). Les hormones thyroïdiennes de la mère sont également transférées au fœtus via le placenta (Guyot, Rollin 2007). Ce transfert reste faible car, chez les ruminants, la thyroïde fœtale est fonctionnelle à partir du second trimestre de gestation (Hidiroglou 1980) et un transfert bidirectionnel de la T4 se met en place au cours des 10 dernières semaines de gestation (Miller, Swanson, Spalding 1975). Les concentrations en iode plasmatique et en T4 du veau à la naissance sont supérieures à celle de sa mère (McCoy et al. 1997). En 1967, Miller et al. ont obtenu des concentrations plasmatiques en iode 5 fois supérieures chez les nouveau-nés par rapport à ceux de leur mère en fin de gestation (32,8 µg/100 mL et 7,8 µg/100 mL respectivement). De plus, ils ont également observé que le liquide amniotique contenait plus d'iode que le plasma fœtal. Ces résultats nous montrent que l'iode excrété dans l'urine du fœtus pénètre dans le liquide amniotique, lui servant de réservoir. En fin de gestation, le fœtus ingère une quantité importante de liquide amniotique, pouvant ainsi lui apporter de l'iode accumulé durant la gestation (Miller et al. 1967). Ainsi un ratio en iode veau/mère élevé peut être expliqué par ce recyclage de l'iode excrété dans le liquide amniotique. L'iode (Miller et al. 1967) et la thyroxine (Hernandez et al. 1972) diminuent rapidement au cours des premiers jours de vie, suggérant une élimination urinaire et fécale efficace de l'iode après la mise-bas. Toutefois, Hernandez et al. (1972) explique que la réserve de T4 extrathyroïdienne rapidement disponible joue un rôle essentiel dans l'adaptation du veau nouveau-né à son environnement. Cela nous montre l'importance d'un apport alimentaire en iode adéquat pour les vaches au cours de leur gestation.

d. Le sélénium

D'après Goonerate et Christensen (1989), les concentrations hépatiques fœtales en sélénium augmentent significativement ($P < 0,05$) tout au long de la gestation. Une supplémentation des mères en sélénium durant toute la gestation est nécessaire pour le développement du fœtus. Plus récemment, Abdelrahman et Kincaid (1993), ont constaté que ces concentrations augmentent entre le 3^{ème} et le 7^{ème} mois de gestation puis diminuent au cours des 2 derniers mois. La supplémentation des vaches en sélénium est donc nécessaire et très importante pendant les 60 derniers jours de gestation afin de protéger les futurs nouveau-nés des maladies liées aux carences en sélénium (Abdelrahman, Kincaid 1995; Van Saun, Herdt, Stowe 1989). Les teneurs hépatiques sont généralement plus élevées chez le fœtus par rapport à celles de leur mère et ce, durant toute la gestation (Goonerate, Christensen 1989; Van Saun, Herdt, Stowe 1989). Cela signifie que le transfert placentaire du sélénium est efficace chez les bovins et que le fœtus est capable de l'accumuler dans ses tissus.

De plus, la concentration sanguine en sélénium et l'activité de la GSH-pxe des nouveau-nés sont corrélées positivement ($P < 0,001$) avec celles de leur mère (Enjalbert et al. 1999). De grandes quantités de sélénium sont transférées de la mère vers le fœtus durant le dernier trimestre de gestation (Van Saun, Herdt, Stowe 1989). Par ailleurs, la concentration sanguine en sélénium chez les veaux issus de mères carencées est beaucoup plus élevée que chez les veaux de mères supplémentées à hauteur de leur besoin (Koller, Whitbeck, South 1984). Le sélénium sera stocké par le fœtus au détriment des réserves de sa mère. Pour couvrir ses besoins en sélénium, le nouveau-né doit avoir des concentrations hépatiques supérieures à 2.2 ppm de MS de foie, des concentrations sanguines (sang total) supérieures à 120 ng/mL (Van Saun, Herdt, Stowe 1989) et une teneur plasmatique de 0,04 µg/mL de sélénium (Abdelrahman, Kincaid 1995). Abdelrahman et Kincaid (1995) ont démontré qu'une supplémentation des mères par bolus intraruminal délivrant au moins 3 mg de sélénium (forme de sélénite de sodium) par jour est nécessaire pendant les 2 derniers mois de gestation pour que les veaux naissent avec des concentrations plasmatiques en sélénium adéquates.

Le statut en sélénium chez le fœtus est également influencé par la forme alimentaire du sélénium apportée aux mères. Guyot et al. ont mis en évidence en 2009 que les concentrations plasmatiques en sélénium chez les veaux sont plus importantes ($P < 0,01$) lorsque les mères (de race Blanc bleu belge) ont consommé une forme organique de sélénium (levure sélénée) par rapport à une forme inorganique (sélénite de sodium). Chez les ruminants, le placenta pourrait former une barrière au passage du sélénite. De plus, la sélénométhionine est prélevée par le placenta à partir du sang maternel et elle est activement transportée, contre un gradient de concentration, vers le fœtus (Hidiroglou 1980). Il est donc important d'apporter du sélénium (idéalement sous forme organique) tout au long de la gestation et notamment en fin de gestation.

BILAN

Les besoins en oligo-éléments pour les 4 oligo-éléments étudiés augmentent en fin de gestation. Cette augmentation est compensée par un transfert plus important de la mère au fœtus durant cette période. Le veau nouveau-né a donc une réserve d'oligo-éléments indispensable pour ses premiers jours de vie. Par conséquent, les recommandations d'apport en oligo-éléments chez les mères augmentent en fin de gestation.

2.1.3.2 Les apports en oligo-éléments chez les nouveau-nés

Le colostrum apporte aux nouveau-nés une quantité importante d'immunoglobulines (Ig) et d'énergie indispensables pour la mise en place d'un système immunitaire efficace. Il est également source de protéines, de matières grasses, de vitamines (β -carotène, vitamines A, B, D et E) de minéraux (calcium, phosphore, magnésium, sodium, potassium...) dont des oligo-éléments (zinc, iode, cobalt, sélénium, cuivre...) et de cellules (cellules épithéliales, érythrocytes, leucocytes). Le colostrum mais également le lait (sélénium, zinc, cuivre...) sont des sources d'oligo-éléments pour les jeunes veaux.

L'apport alimentaire en oligo-éléments chez les mères peut influencer leurs concentrations dans le lait (*Cf. Tableau 3*). En effet, il existe une forte corrélation entre l'apport alimentaire en iode et sa teneur dans le lait (Alderman, Stranks 1967; Flachowsky et al. 2014; Lamand, Tressol 1992; Castro et al. 2011). Environ 8 % de l'apport quotidien en iode est sécrété dans le lait (Miller, Swanson, Spalding 1975). À défaut d'utilisation des produits désinfectants mammaires iodés, en élevage allaitant, une supplémentation en iode plus importante en stabulation en hiver explique très probablement les teneurs significativement ($P < 0,001$) plus élevées dans le lait d'hiver que dans le lait d'été (en moyenne 97 $\mu\text{g}/\text{kg}$ et 44 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de lait, respectivement) (Lamand, Tressol 1992). En cas de déficit alimentaire en iode, le lait peut être carencé (McCoy et al. 1997).

Cependant, cette concentration dans le lait n'a pas été retrouvée pour le cuivre (Muehlenbein et al. 2001; Enjalbert et al. 2002) et le zinc (Miller et al. 1965). Cependant, en cas de carences alimentaires en cuivre et en zinc, leurs teneurs dans le lait baissent (NRC 1996; Miller 1970).

Pour le sélénium, une supplémentation maternelle durant les deux derniers mois de gestation a permis d'augmenter la teneur en sélénium dans le colostrum (Abdelrahman, Kincaid 1995). L'effet de la supplémentation dépend également de la source en sélénium. Chez les races laitières comme allaitantes, le sélénium sous forme organique (levure sélénée) apporte plus de sélénium que les formes inorganiques (Ortman, Pehrson 1999; Guyot et al. 2009).

Le colostrum est généralement plus riche en oligo-éléments que le lait (*Cf. Tableau 3*). Les concentrations en oligo-éléments diminuent rapidement au cours des 12 premières heures après le vêlage pour atteindre les valeurs du lait (De Maria, Angelucci 1978).

Tableau 3 : Teneurs en oligo-éléments du colostrum et du lait de vache, et effets de l'apport de compléments pendant la gestation (Enjalbert 2009a)

	Colostrum (mg/L)	Lait (mg/L)	Effets d'apports complémentaires
Cuivre	0,49 à 0,6	0,15 à 0,32	Non
Zinc	12 à 40	3,0 à 5,8	Non
Iode	0,02 à 0,3	0,01 à 0,1	Oui
Sélénium	0,03 à 0,06	0,01 à 0,025	Oui

Les oligo-éléments du colostrum et du lait sont également transférés aux veaux. Cependant, plusieurs auteurs ont montré que le transfert placentaire reste beaucoup plus efficace que le transfert par le colostrum/lait. En 1999, Enjalbert et al. ont mis en évidence, sur des vaches de race à viande, que l'apport alimentaire en sélénium après la mise-bas a moins d'effet sur le statut des veaux que l'apport en fin de gestation. Koller, Whitbeck, South avaient obtenu des résultats similaires en 1984. Ainsi, le transfert placentaire en sélénium est plus efficace que le transfert par le lait. De même, à la naissance, la forte concentration en iode dans le plasma des veaux nouveau-nés est davantage le résultat d'échanges placentaires que d'un apport colostrale (Austin et al., 1980). De plus, au cours de la vie, la concentration de cuivre dans le foie est la plus importante à la naissance. Ce stock va rapidement diminuer peu après la naissance pour répondre aux besoins des autres tissus du nouveau-né. Ainsi, chez les ruminants, face à la faible concentration en cuivre dans le colostrum et le lait, le stockage hépatique constitue un avantage certain pour le veau pour couvrir à ses besoins (Hidiroglou, Knipfel 1981). C'est également le cas pour le zinc. Le zinc est présent en faible quantité dans le colostrum mais surtout dans le lait. Le transfert post-partum du zinc est donc limité (Guyot 2013). L'utilisation des réserves hépatiques en cuivre et en zinc va faire augmenter les concentrations plasmatiques chez les veaux au cours de leur première semaine de vie (Kume, Tanabe 1993; Pryor 1976).

Tous ces résultats nous montrent qu'un apport alimentaire en oligo-éléments chez les vaches en fin de gestation est essentiel et indispensable pour constituer les réserves importantes pour la santé et l'immunité du veau, et ce, dès sa naissance. Le colostrum puis le lait ne permettant pas de couvrir les besoins en oligo-éléments du veau en croissance. Des apports en minéraux par des aliments solides (concentrés par exemple) sont alors indispensables.

Enfin, les oligo-éléments (et les vitamines fonctionnant en synergie) ont une importance pour la qualité immunitaire du colostrum et donc sur le transfert d'immunité passive chez le veau (Cf. Figure 4). Les carences en sélénium, cuivre, zinc, iode, vitamine A et E dégradent la production colostrale (Chantreau, Amiot 2021) ainsi que la quantité d'immunoglobulines du colostrum (Maillard, Guin 2017).

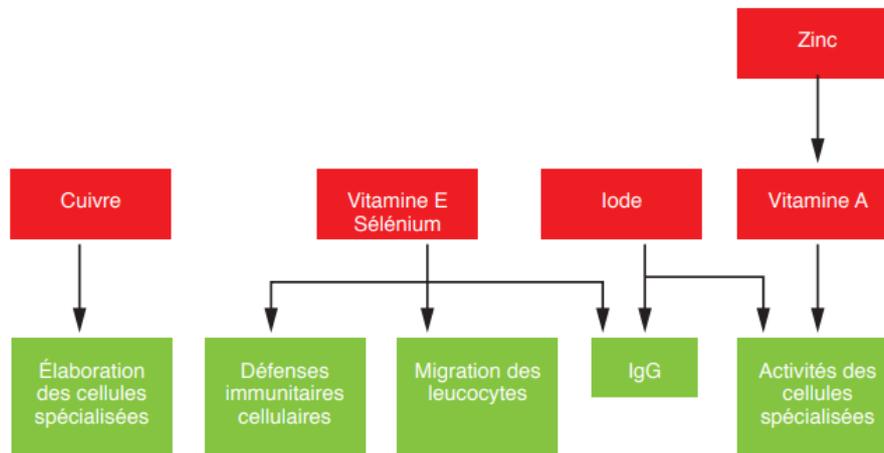


Figure 4 : Influence des vitamines et des oligo-éléments sur la qualité du colostrum (Chantreau, Amiot 2021)

Le sélénium a une importance majeure dans le transfert d'immunité passive du veau. Swecker et al. (1995) ont mis en évidence qu'une supplémentation en sélénium par voie orale pendant la seconde moitié de la gestation (120 mg/kg) chez les vaches de races allaitantes broutant des pâturages carencées en sélénium a permis d'améliorer la concentration des IgG dans le colostrum et dans le sérum des veaux. Awadeh, Kincaid, Johnson (1998) ont obtenu, plus récemment, des résultats similaires. Cependant, la concentration d'IgM colostrale n'a pas été affectée dans ces deux expériences.

2.1.3.3 Les oligo-éléments pour la santé de la mère en péripartum

La période de péripartum, qui s'étend 3 semaines avant et 3 semaines après la mise-bas, est une phase relativement critique et stressante pour les vaches. Durant cette période de transition, l'organisme doit faire face à de nombreux changements métaboliques, hormonaux, physiologiques et immunitaires (Lopreiato et al. 2020) (Cf. Figure 5). Les stress physiologiques et métaboliques peuvent favoriser le stress oxydant, l'inflammation et un dysfonctionnement immunitaire (Osorio et al. 2016). En péripartum, les vaches sont alors plus sujettes à développer des maladies infectieuses (mammites, métrites, rétention placentaire, œdème mammaire...) (Xiao et al. 2021). Les vaches laitières seront beaucoup plus touchées par ces maladies en péripartum que les vaches allaitantes. Cela peut s'expliquer par une production laitière nettement plus importante.

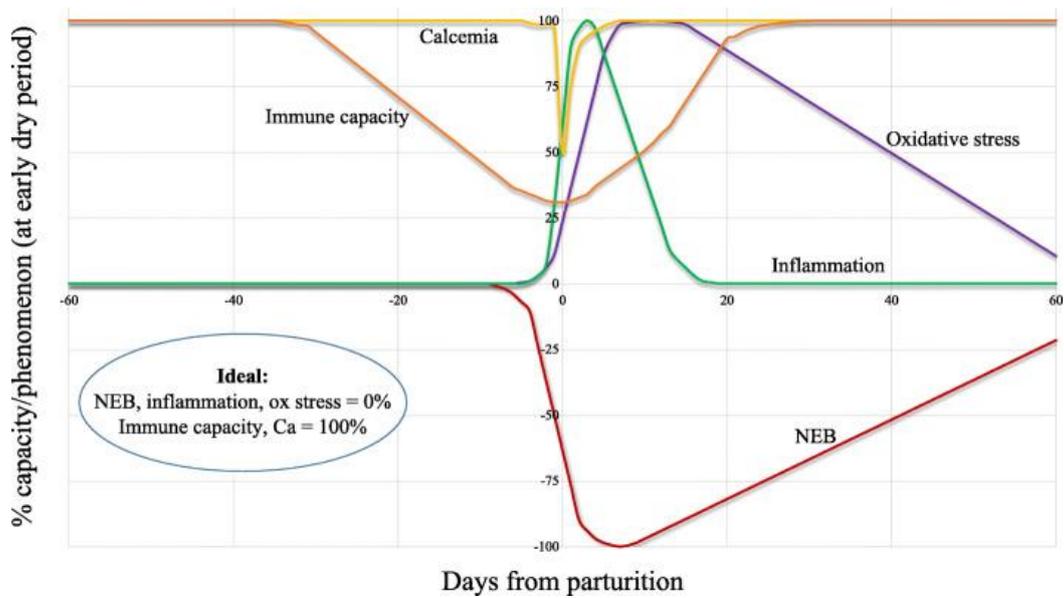


Figure 5 : Schéma théorique des changements des principaux aspects physiologiques des sujets sains pendant la période de transition. Idéalement, le bilan énergétique négatif (NEB), l'inflammation et le stress oxydant seraient proches de zéro (c'est-à-dire absence des phénomènes), alors que l'immunocompétence et la calcémie seraient proches de 100 % de leur niveau optimal (Trevisi, Minuti 2018)

Les oligo-éléments (cuivre, zinc et sélénium) jouent un rôle essentiel dans la fonction immunitaire (Yatoo et al. 2013) et en particulier dans les systèmes antioxydants (Siliart 2007). L'augmentation accrue des besoins en oxygène lors des périodes de forte demande métabolique, comme en péripartum, provoque un stress oxydant important (Sordillo, Aitken 2009). Osorio et al. (2016) ont ainsi observé une très forte augmentation de la synthèse totale de substances oxydantes (ROMt) et une forte réduction de la capacité de désactivation des radicaux oxydants (ORAC) en péripartum chez la vache laitière (Cf. Figure 6).

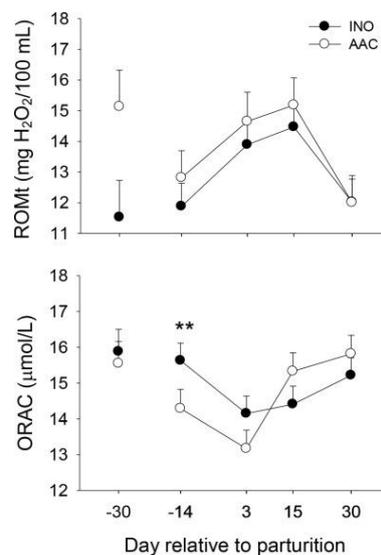


Figure 6 : Evolution des substances oxydantes (ROMt) et de la capacité de désactivation des radicaux oxydants (ORAC) chez des vaches laitières en péripartum (Osorio et al. 2016)

Par conséquent, le stress oxydant augmente les besoins en antioxydants dépendants des oligo-éléments, en péripartum (sélénium pour les glutathion peroxydases et les thioredoxines réductases, le cuivre et le zinc pour la SOD et le cuivre pour la céruloplasmine) (Spears, Weiss 2008; Mezzetti, Bionaz, Trevisi 2020).

Le statut en oligo-éléments est largement modifié en péripartum. La concentration plasmatique en zinc diminue brutalement autour de la mise-bas (Goff, Stabel 1990; Pryor 1976; Dufty, Bingley, Cove 1977; Meglia et al. 2001) (Cf. Figure 7). Cette chute est très probablement liée à la formation du colostrum (Goff, Stabel 1990; Pryor 1976) et à un important stress au moment de la mise-bas dû à une réaction inflammatoire aiguë dans l'utérus (encore plus marqué en cas de dystocie) (Pryor 1976; Dufty, Bingley, Cove 1977). Aussi, le stress engendre une absorption importante de zinc par le foie nécessaire pour la synthèse accrue de métallothionéine (Xin et al. 1993). Le zinc est alors redistribué et séquestré dans le foie (Osorio et al. 2016).

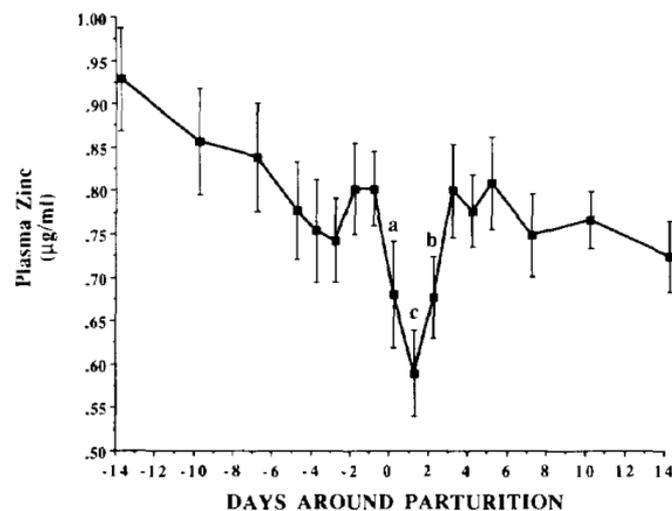


Figure 7 : Concentration plasmatique moyenne en zinc (+/- écarts-types) chez 18 vaches pendant la période périnatale. La concentration de zinc de base (moyenne des jours 14, 10 et 7 avant la parturition) est de 0,86 +/- 0,05 µg/ml plasma. Les différences ^{a,b,c} avec la concentration de base sont respectivement de P < 0,05, P < 0,01 et P < 0,001 (Goff, Stabel 1990)

Les concentrations plasmatiques en cuivre diminuent en fin de gestation et augmentent autour du part (Meglia et al. 2001) (Cf. Figure 8). Avant la mise-bas, la priorité est donnée au veau. Le cuivre est transféré par le placenta au foie du fœtus (Xin et al. 1993) mais il va également servir pour la synthèse du colostrum. Au moment de la mise-bas, l'augmentation de la cuprémie est associée à une augmentation de la céruloplasminémie, en tant que protéine de transport (Hidiroglou, Knipfel 1981). La mise-bas engendre des lésions tissulaires et cellulaires au niveau de l'utérus et du vagin. Les concentrations plasmatiques en céruloplasmine et en cuivre vont alors augmenter en réponse à l'inflammation provoquée par la mise-bas (Meglia et al. 2001; Yattoo et al. 2013).

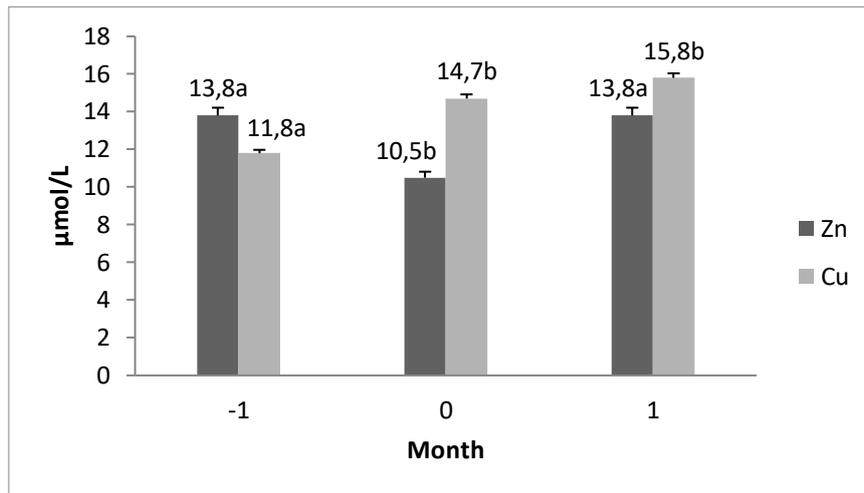


Figure 8 : Concentrations sériques de zinc (Zn) et de cuivre (Cu) ($\mu\text{mol/L}$) dans des échantillons de sang prélevés un mois avant le vêlage prévu (-1), à la mise bas (0) et un mois après le vêlage (+1) de 10 vaches laitières. Les valeurs avec des lettres différentes dans chaque paramètre diffèrent significativement ($P < 0,05$) (Meglia et al. 2001)

Comme le cuivre, le sélénium est transféré au veau en fin de gestation. Les concentrations plasmatiques sont faibles au moment du vêlage puis elles augmentent progressivement durant le premier mois d'allaitement (Miller et al. 1995; Weiss, Colenbrander, Cunningham 1984). Les études sur le statut de l'iode en péripartum sont rares.

Quant bien même, les oligo-éléments sont des composants essentiels du système antioxydant, les études montrent que leurs concentrations plasmatiques ont tendance à diminuer chez les bovins en péripartum. Une carence en cuivre, zinc ou sélénium peut affaiblir le système immunitaire au moment de la mise-bas et exposer les mères à de nombreuses maladies (Spears, Weiss 2008). Un apport adéquat en oligo-éléments est essentiel pour assurer une transition optimale entre la gestation et l'allaitement du veau (Andrieu 2008).

BILAN

Tableau 4 : Recommandations en oligo-éléments (mg/kg de MS) pour les vaches laitières au péripartum (INRA 1988; Enjalbert 2009b)

	Cuivre	Zinc	Iode	Sélénium
Bovin Adulte	10	50	0,5	0,1
<i>En fin de gestation</i>	12-18	21-30	0,4-0,5	0,3
<i>En lactation</i>	11	43-55	0,4-0,6	0,3

Le tableau 4 résume les besoins en oligo-éléments chez les vaches adultes en péripartum. Ainsi, en fin de gestation, les besoins augmentent pour le cuivre, le sélénium et l'iode. Ils seront augmentés plutôt en début de lactation pour le zinc et resteront stables pour l'iode.

2.2 Notion de carence chez les bovins

2.2.1 Les carences primaires en oligo-éléments

Les carences primaires se définissent par un apport alimentaire insuffisant d'oligo-éléments. En système herbager, la ration se compose quasi exclusivement d'herbe sous forme de pâturage, d'ensilage, d'enrubannage ou de foin. L'ajout de concentrés est relativement faible voire nul. Une enquête nationale menée en 1973 par Bellanger, Périgaud et Lamand montre que les foins de premières coupes sont tous carencés en oligo-éléments (cuivre, zinc et sélénium). Cela a donc des répercussions sur les animaux et les carences en cuivre, zinc, sélénium et iode sont généralisées sur tout le territoire français (Lamand, Périgaud 1973; Périgaud, Lamand 1973). Cependant, ces carences sont très rarement sévères. En France, les sub-carences sont généralisées pour le cuivre et probablement aussi pour le zinc et le sélénium (Périgaud, Bellanger, Lamand 1972; Périgaud, Lamand 1973). Les carences sub-cliniques peuvent engendrer, dans la majorité des cas, des pertes de productivité, des troubles de la reproduction, des troubles du système immunitaire mais parfois, l'absence d'expression de signes cliniques complique sérieusement le diagnostic.

2.2.2 Les carences secondaires en oligo-éléments

En plus des privations d'oligo-éléments liées à un défaut d'apport alimentaire, il existe également des carences secondaires liées à la consommation d'un ou plusieurs antagonistes défavorables à l'absorption et l'utilisation métabolique normales d'un minéral (Cf. Tableau 5 et Figure 9). Des interactions avec des constituants alimentaires ou autres, peuvent donc affecter l'efficacité d'absorption et de stockage des oligo-éléments (Enjalbert, Lebreton, Salat 2006). Leur disponibilité sera alors diminuée et des carences seront induites (Arthington 2003). Tous ces facteurs sont alors susceptibles de modifier les recommandations d'apports en oligo-éléments.

Tableau 5 : Principaux facteurs défavorables au métabolisme des oligo-éléments (Lamand 1991; Meschy 2017; Spears 2003; NRC 2001; Lamand et al. 1979)

Oligo-éléments	Facteurs défavorables	Actions	Références
Cuivre	Excès de soufre et de molybdène (Cf. Figures 9 et 10)	Les thiomolybdates diminuent l'absorption intestinale et hépatique du cuivre et inhibent les enzymes cupro-dépendantes.	(Meschy 2017) (Lamand 1991)
		L'excès de soufre conduit à la formation de sulfure de cuivre insoluble, diminuant la digestibilité du cuivre.	(Meschy 2017) (Spears 2003)
	Excès de fer (eau de boisson, terre, aliment riche en fer)	Concurrence pour les protéines de transport et diminution de l'activité de la SOD. Interférence seulement retrouvée chez les bovins adultes (nécessité d'avoir un rumen fonctionnel).	(Meschy 2017) (Spears 2003)

	Excès de zinc	Concurrence pour les protéines de transport et liaison du cuivre à la métallothionéine.	(Meschy 2017) (NRC 2001)
	Calcium	Le calcium augmente le pH intestinal entrainant une précipitation du cuivre sous forme d'hydroxyde faiblement assimilable.	(Lamand 1991)
	Ingestion de terre (notamment au pâturage)	L'ingestion de terre au pâturage peut représenter jusqu'à 10 % de la MS ingérée. Ce pourcentage engendre une réduction d'absorption du cuivre de 50 %.	(NRC, 2001)
		Diminution de la digestibilité du cuivre chez des agneaux en croissance nourris avec un ensilage de ray-grass contaminé par 5 % de terre.	(Lamand et al. 1979)
	Accélération du transit intestinal (diarrhée, ration broyé, jeune herbe)	Diminution de la digestibilité.	(Lamand 1991)
Zinc	Excès de cuivre	Similitudes dans la structure électronique des ions Zn^{2+} et Cu^{2+} et un rapport $Cu/Zn > 50$ engendre une diminution de la digestibilité du zinc.	(Meschy 2017) (NRC 2001)
	Excès de cuivre ou de cadmium	Freine le transport du zinc vers le sang en stimulant la synthèse de métallothionéine dans les érythrocytes.	(Meschy 2017)
	Fer	Compétition pour les sites d'absorption.	(Lamand 1991)
	Calcium lié aux phytates des plantes	Diminution de l'absorption du zinc chez les jeunes bovins avec un rumen non fonctionnel (phytates métabolisés par les micro-organismes du rumen).	(NRC 2001) (Lamand 1991)
	Ingestion de terre	Diminution de la digestibilité du zinc chez des agneaux en croissance nourris avec un ensilage de ray-grass contaminé par 5 % de terre.	(Lamand et al. 1979)
	Défauts protéiques de la ration	L'apport protéique joue un rôle important dans l'absorption intestinale du zinc.	(Lamand 1991)
	Accélération du transit intestinal (diarrhée, ration broyée, jeune herbe)	Diminution de la digestibilité.	(Lamand 1991)
Iode	Agents goitrigènes (glucosinolates et leurs dérivés)	Diminution du transport de l'iode à travers la membrane cellulaire des follicules thyroïdiens (thiocyanate et isothiocyanate). Diminution de la synthèse des hormones thyroïdiennes (goitrine inhibe la thyroperoxydase).	(Meschy 2017) (NRC 2001)
	Carence en sélénium	Altération du fonctionnement thyroïdien par la diminution de l'activité de la thyroperoxydase et synthèse insuffisante de 5'-désiodases limitant la conversion de T4 en T3.	(Meschy 2017)
Sélénium	Excès de soufre	Compétition entre les deux éléments pour les acides aminés (substitution entre ces deux éléments).	(Meschy 2017) (Lamand 1991)
	Carence en vitamine E	Entraine une quantité nécessaire supplémentaire en sélénium.	(NRC 2001)

Nous allons voir en détail le mécanisme aboutissant à une carence secondaire en cuivre dû à un excès de soufre (S) et de molybdène (Mo) dans la ration (Cf. Figure 9). L'effet antagoniste du molybdène sur le cuivre n'a lieu qu'en présence de soufre.

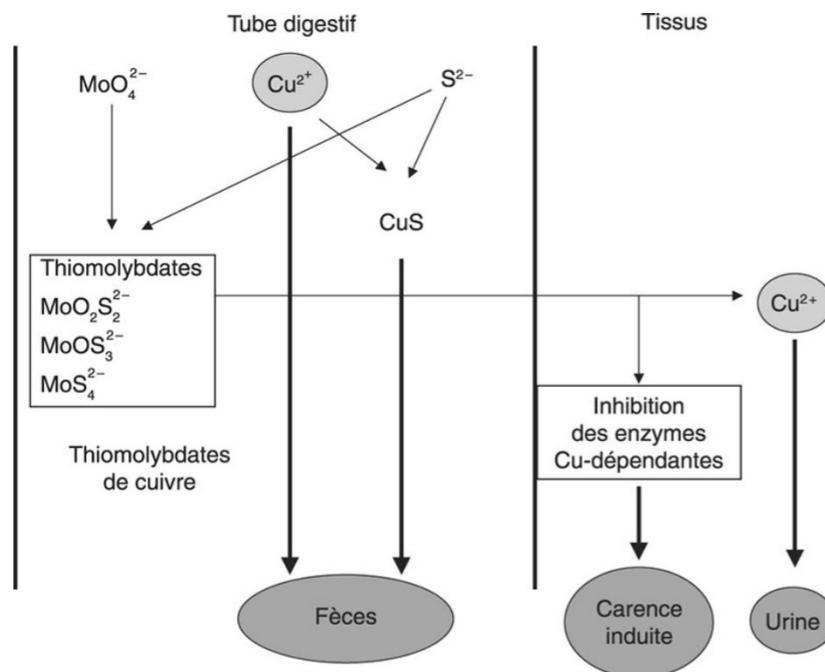


Figure 9 : Interactions entre cuivre, soufre et molybdène (Meschy 2017)

Dans le rumen des bovins sevrés, les micro-organismes réduisent le soufre en sulfures (S^{2-}) qui se lie très faiblement au cuivre (CuS). Cette forme insoluble n'est pas assimilable. Une partie sera alors éliminée par voie fécale. En présence de molybdène (MoO_4^{2-}), les sulfures vont participer à la synthèse de thiomolybdates (Cf. Figure 10).

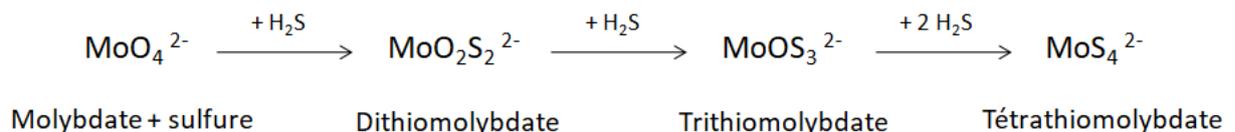


Figure 10 : Synthèse des thiomolybdates (Lamand 1991)

Dans les conditions physiologiques du rumen, la formation de tétrathiomolybdate est très peu probable. Les thiomolybdates vont complexer le cuivre pour former des thiomolybdates de cuivre insolubles ($CuMoS_4$) diminuant l'absorption intestinale du cuivre alimentaire. Les thiomolybdates peuvent également traverser la barrière intestinale et inhiber les enzymes cupro-dépendantes dans les tissus (Lamand 1991; McDonald et al. 2011) (Cf. Figure 9).

À partir de n'importe quelles formes chimiques du soufre, l'interférence peut se produire, chez les petits ruminants, avec un taux de molybdène supérieur à 2,4 mg Mo/kg de MS (Lamand 1989). Ces teneurs sont rarement rencontrées en France (Lamand 1991). Chez

des bovins au pâturage, l'idéal est d'avoir un apport en cuivre 5 à 10 fois supérieur à celui du molybdène, le rapport minimum acceptable est $Cu/Mo = 2$ (Rollin 2002). De plus, une interférence avec le soufre n'apparaît qu'à partir de 3,5 mg/kg de S dans la MS ce qui est également rare dans les rations des bovins (Meschy 2017). Ainsi, pour limiter ces formations, l'apport maximal recommandé est de 3 mg de molybdène et 2 mg de soufre par kg de MS.

Ces carences secondaires vont avoir des conséquences négatives et seront à prendre en compte dans les calculs de ration et la complémentation minérale des animaux.

2.2.3 Les manifestations cliniques lors de carences

Une carence est généralement définie comme une concentration inférieure à laquelle les signes cliniques de la maladie de carence sont susceptibles de se produire.

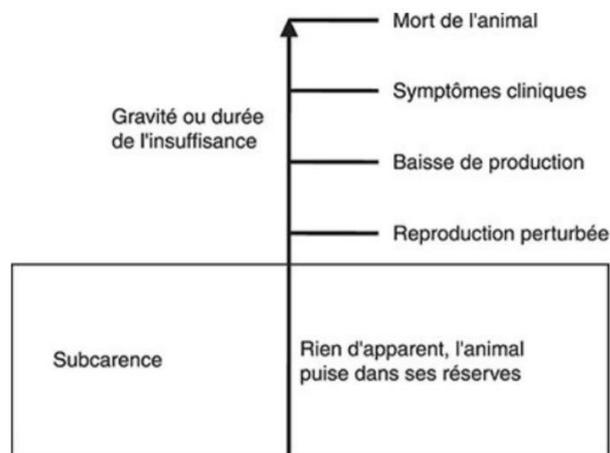


Figure 11 : Progression des manifestations de carence (Meschy 2017)

Les signes cliniques liés à des carences en oligo-éléments n'apparaissent pas dès le début d'une période de distribution d'une ration carencée (Cf. Figure 11). Certains oligo-éléments comme le cuivre, et dans une moindre mesure l'iode, sont mis en réserve par l'organisme (foie, thyroïde...). Ces réserves sont mobilisées pour mettre en circulation ces oligo-éléments lors d'apports alimentaires insuffisants. Le métabolisme fonctionne normalement le temps que les concentrations sanguines sont maintenues dans des normes physiologiques. Les capacités de mise en réserve vont alors déterminer le délai d'apparition des signes cliniques de carence. Si une ration carencée continue à être consommée, les réserves s'épuisent progressivement et les concentrations sanguines en oligo-éléments diminuent. Dans un premier temps, nous allons voir une baisse de performance (trouble de la reproduction, baisse d'appétit, chute de production laitière...). Puis les premiers signes cliniques plus ou moins spécifiques aux rôles biologiques des oligo-éléments apparaissent. En cas de carence grave et/ou durable, le bovin très affaibli peut mourir (Meschy 2017; Suttle 2010).

Nous allons nous intéresser aux signes cliniques lors de carences sévères. Ces symptômes sont généralement très évocateurs d'une carence mais ne sont pas toujours spécifiques de celle-ci. Ils conduiront le vétérinaire à rechercher d'éventuelles hypothèses diagnostiques incluant les carences en oligo-éléments.

2.2.3.1 La carence en cuivre

Les faibles teneurs en cuivre des fourrages sont généralisées sur le territoire français (Lamand, Périgaud 1973). Le cuivre étant stocké en grande quantité dans le foie, le délai d'apparition des signes cliniques suite à une carence alimentaire en cuivre sera relativement long : environ 170 jours (Brulle 2008) (Cf. Figure 12). Les symptômes seront toujours plus sévères en cas d'excès de molybdène (carence secondaire). Ces carences vont alors perturber les voies enzymatiques impliquant le cuivre (Auza 1983). Ainsi, le déficit en cuivre sera associé à de nombreux symptômes.

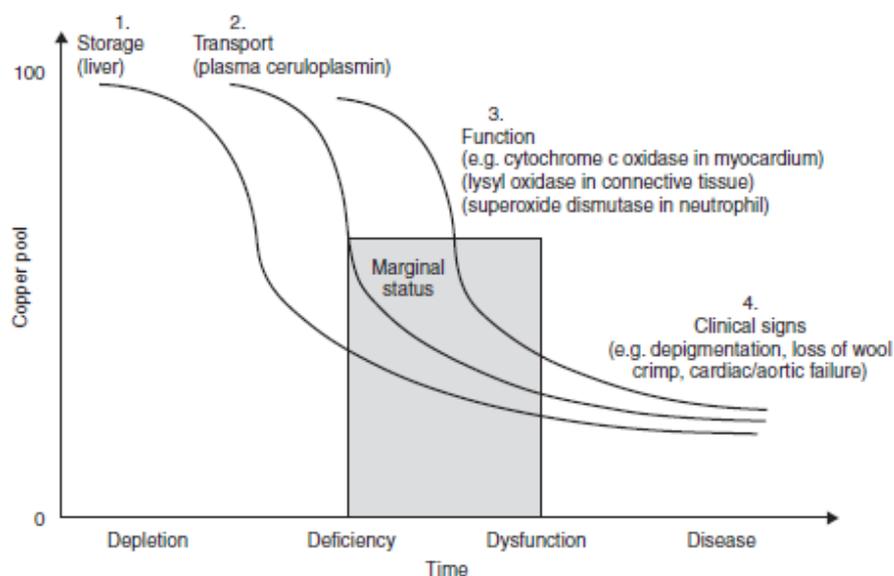


Figure 12 : La séquence des changements biochimiques conduisant à l'apparition de signes cliniques de carence en cuivre (Suttle 2010)

a. Signes cliniques spécifiques et signes d'appels

- *Troubles du pelage* : Le premier signe d'appel précoce et spécifique d'une carence en cuivre est la perte de pigmentation des poils (achromotrichie) (Meschy 2017). Ces signes sont observables chez le jeune comme chez l'adulte. Les poils sont rugueux, plus ou moins hérissés et « piqués ». La décoloration des poils débute généralement autour des oreilles et des yeux (« lunette »), puis on peut la retrouver autour du mufle, des joues et sur tout le corps. Elle se localise généralement à la périphérie des taches colorées. Le poil noir devient roussâtre et le poil fauve pâlit et devient jaune (Coïc, Coppenet 1989; Bellanger, Lamand, Périgaud 1970) (Cf. Figures 13 et 14).



Figure 13 : Décoloration des poils péri-oculaires ("lunettes") (Lamand 1976)



Figure 14 : Décoloration des poils sur une Prim'Holstein (Lamand 1976)

- *Troubles de l'ingestion* : Chez les bovins, l'appétit est toujours modifié. La perte d'appétit engendre un défaut de production de lait et de masse musculaire et grasseuse. Les jeunes bovins peuvent présenter un retard de croissance (Bellanger, Lamand, Périgaud 1970).
- *Troubles cardiaques* : On observe une hypertrophie puis une dégénérescence progressive du myocarde. Le muscle cardiaque est remplacé progressivement par du tissu fibreux. Le cœur ne pouvant plus jouer son rôle de pompe, un effort physique ou une excitation peut conduire à des morts soudaines et rapides sans signe prémonitoire. Les bovins peuvent également présenter un pouls jugulaire intense, des accidents congestifs divers (pulmonaires, mammaires ou podaux) et de la fourbure d'origine cardiaque se traduisant par un piétinement incessant. L'hypertrophie cardiaque peut également engendrer de la mortalité périnatale (Coïc, Coppenet 1989; Suttle 2010; Bellanger, Lamand, Périgaud 1970; Olivares et al. 2019; Enjalbert 2009b).
- *Troubles osseux* : Chez les jeunes bovins en croissance, une carence en cuivre peut conduire à l'élargissement des épiphyses des os longs des membres inférieurs. Les animaux présentent une hypertrophie osseuse des boulets (Cf. Figure 15). Ce signe clinique est relativement courant. Par ailleurs, les os sont fragilisés engendrant des fractures spontanées des côtes, du fémur ou de l'humérus. De plus, les bovins adultes peuvent être atteints d'ostéoporose augmentant également la fréquence des fractures spontanées (Suttle 2010; Bellanger, Lamand, Périgaud 1970).



Figure 15 : Hypertrophie des boulets chez un veau (W.Blower, Weaver 2006)

- *Troubles sanguins* : Une anémie peut se développer en cas de carence en cuivre sévère ou chronique. Le déficit en céruloplasmine (enzyme ferroxidase), conduit à un défaut de mobilisation du fer stocké (Francoz, Couture 2014). Chez les bovins adultes, on retrouve des anémies hypochromes macrocytaires (NRC 2001; Suttle 2010).
- *Troubles digestifs* : Les diarrhées chroniques dues à une carence en cuivre sont toujours associées à un excès de molybdène dans l'alimentation (Bellanger, Lamand, Périgaud 1970). À tout âge, la carence en cuivre engendre des diarrhées liquides, avec un amaigrissement et de l'anorexie. Généralement, tout un lot est touché (Ravary-Plumioën 2016). En cas de déficit sévère, une diminution de la cytochrome oxydase provoque une atrophie des villosités intestinales réduisant l'absorption des nutriments et provoquant une diarrhée osmotique (Corah, Ives 1991). Des ulcères de caillette sont également rapportés chez les jeunes bovins de boucherie carencés en cuivre (Francoz, Couture 2014; Ensley 2020). Par ailleurs, un déficit en cuivre chez les vaches augmente le risque de diarrhée chez les veaux même pour les jeunes issus de mères vaccinées contre les principaux agents de l'entérite néonatale. Les diarrhées néonatales sont liées à une altération de l'immunité des mères carencées en cuivre (Enjalbert, Lebreton, Salat 2006).
- *Boiteries* : Chez les bovins adultes, les carences en cuivre peuvent être associées à des fissures plus fréquentes du sabot ainsi qu'à une fréquence importante des cas de fourchet et d'ulcère de la sole (Guatteo, Douart, Fortineau 2013).
- *Immunodépression* : La carence en cuivre diminue la capacité de destruction des microorganismes des neutrophiles. Les animaux sont alors plus sensibles aux infections (NRC 2001).

b. Signes cliniques autour de la reproduction

Un déficit en cuivre va affecter les performances de reproduction. Une diminution de la fertilité est observée dans des cas de carence en cuivre secondaire à un excès de molybdène (Suttle 2010; Meschy 2017). Avec le zinc, le cuivre joue un rôle important dans la régulation de la production de la progestérone par les cellules lutéales (corps jaunes) via la SOD (Yatoo et al. 2013). Ainsi, un déficit en cuivre entraîne une diminution de l'activité ovarienne, une diminution du taux de conception et une mortalité embryonnaire (avortement précoce). Une augmentation de la prévalence des kystes ovariens est également rapportée (Ensley 2020). Associée à une carence en zinc, les vaches sont prédisposées au repeat-breeding et à l'anœstrus. Des cas de retentions placentaires ont également été observés (Lequeux 2016). Un apport adéquat en cuivre est nécessaire au bon développement du système nerveux central du fœtus (Guyot 2013).

c. Traitements préventifs et curatifs

En prévention des carences, une supplémentation couvrant les besoins en cuivre est essentielle. Il faut également surveiller les taux de molybdène (et de sulfure) de la ration.

Des traitements curatifs sont disponibles (Francoz, Couture 2014) :

- Par voie orale (sulfate de cuivre)
 - Chez le veau : 4 g, une fois par semaine, pendant 3 à 5 semaines
 - Chez le bouvillon à l'engrais : 4 g par jour pendant 10 jours (Lamand 1991)
 - Chez l'adulte : 8 à 10 g, une fois par semaine, pendant 3 à 5 semaines
- Par voie injectable (glycinate de cuivre, Cu 30 % en sous-cutanée)
 - Chez le veau : 100 à 200 mg (en fonction de l'âge)
 - Chez l'adulte : 400 mg
 - Attention : réaction importante au site d'injection (abcès froid)

En cas de carence secondaire liée à un excès de molybdène, Lamand (1970) estime nécessaire d'ajuster la ration de base à 10 ppm Cu/kg de MS si le taux de molybdène est inférieur à 3 ppm, et à 20 ppm de Cu si le taux de molybdène est compris entre 3 et 10 ppm.

2.2.3.2 La carence en zinc

Les carences en zinc sont présentes un peu partout sur le territoire français (Lamand, Périgaud 1973). Du fait d'un faible stockage de zinc par l'organisme, la mise en place d'une carence peut être rapide, de l'ordre d'une dizaine de jours (Brulle 2008). Chez les ruminants, les signes cliniques apparaissent au bout de 100 jours lors de carence modérée (Lamand et al. 1983).

a. Signes cliniques spécifiques et signes d'appels

- *Troubles de l'ingestion* : Chez l'adulte comme chez le jeune, le premier signe clinique à apparaître est la perte d'appétit (par augmentation de l'expression du gène codant pour la cholécystokinine, médiateur agissant sur les cellules du tube digestif et de la vésicule biliaire (Rollin 2002)). La prise alimentaire devient irrégulière et les animaux ont tendance à trier leur ration et à grignoter. Les bovins vont commencer à maigrir en parallèle de l'intensification de la baisse d'appétit. Le métabolisme des protéines va être perturbé entraînant une chute de la production laitière et un gain quotidien moyen réduit voire nul. Des retards de croissance sont souvent associés à des carences en zinc (Meschy 2017; Suttle 2010; Enjalbert, Lebreton, Salat 2006).

- *Troubles du pelage et de la peau* : Les lésions de la peau sont également des signes cliniques caractéristiques d'une carence prolongée en zinc. La peau s'épaissit et des ulcères peuvent se former (parakérose). Des zones alopéciques localisées dans un premier temps peuvent s'étendre sur tout le corps (Cf. Figure 16). Les animaux carencés en zinc présentent des difficultés à la cicatrisation cutanée suite à des plaies accidentelles (défaut de production de tissu cicatriciel) (Meschy 2017). Les bovins sont alors sujets à diverses maladies cutanées (parasitaires : gale et teigne ; bactériennes : dermatophilose, dermatite digitée ; virales : papillomatose) (Rollin 2002). De plus, une carence en zinc va entraîner une diminution de la kératinisation du canal du trayon et augmenter le risque de mammites (Wilde 2006; Yattoo et al. 2013).



Figure 16 : Alopecie chez un veau de race Normande, âgé de 1 mois, carencé en zinc (Lamand 1976)

- *Boiteries* : Lors de carence en zinc, la synthèse de la kératine est réduite. Les animaux présentent des troubles de la croissance de la corne. Les onglons seront fragiles, mous et parfois vrillés (Meschy 2017). Les sabots sont alors plus sensibles aux infections et aux traumatismes. La peau au niveau des paturons sera également plus sujette aux lésions et à l'installation d'agents pathogènes (par exemple, la maladie de Mortellaro ou les panaris) (Guatteo, Douart, Fortineau 2013).
- *Troubles de la croissance chez le jeune* : Chez le veau, une carence en zinc entraîne essentiellement un retard de croissance (défaut de synthèse de l'hormone de croissance GH (Guyot 2013)), de la mortalité périnatale et une augmentation de la fréquence des diarrhées (Enjalbert, Lebreton, Salat 2006). Les veaux carencés peuvent également présenter d'autres signes cliniques : faiblesse, manque de vitalité, anorexie, rougeur des muqueuses et inflammation du nez et des gencives, démarche raide avec gonflement des extrémités distales à partir des jarrets, zones d'alopecie et épaissement de la peau autour du mufle, des oreilles, des yeux et à l'arrière des cuisses (Rollin 2002).

b. Signes cliniques autour de la reproduction

La carence en zinc aura des conséquences importantes sur les performances de reproduction du mâle. La fécondité des mâles est particulièrement diminuée (Lamand 1991). Un déficit en zinc conduit à des perturbations de la production de la testostérone et de la spermatogénèse. On aura alors un défaut de développement des testicules et une diminution de la qualité de la semence (Yatoo et al. 2013; Lequeux 2016).

De plus, la carence en zinc engendre des troubles de locomotion. Dans les élevages en monte naturelle, essentiellement dans les élevages allaitants, les problèmes de boiterie peuvent avoir un impact important dans l'expression des chaleurs et dans les saillies. Dans un troupeau où les boiteries sont fréquentes, les performances de reproduction sont réduites.

Lors de carence en zinc chez les femelles cyclées, tous les stades du cycle de reproduction peuvent être affectés (Hidiroglou 1979). Avec le cuivre, le zinc joue un rôle important dans la régulation de la production de la progestérone par les cellules lutéales (corps jaunes) via la SOD (Yatoo et al. 2013). La carence en zinc peut entraîner une tératogénèse fœtale, une gestation prolongée, et un nouveau-né faible. De par son implication dans la synthèse des prostaglandines, un déficit peut conduire à des avortements et rendre le part difficile avec une réduction des contractions utérines nécessaires à l'expulsion du fœtus (Hostetler, Kincaid, Mirando 2003). Des saignements au vêlage et un retard d'involution utérine sont également fréquents (Rollin 2002). Les rétentions placentaires sont rapportées en cas de carence marginale en zinc, augmentant le risque de métrite (Enjalbert, Lebreton, Salat 2006). Associée à une carence en cuivre, les vaches sont prédisposées au repeat-breeding et à l'anœstrus (Lequeux 2016).

c. Traitements préventifs et curatifs

En prévention, il faut vérifier la ration et compléter les animaux afin de couvrir leur besoin en zinc.

En cas de carence en zinc modérée à sévère, on peut mettre en place un traitement curatif (Francoz, Couture 2014) :

- Par voie orale (acétate ou sulfate de zinc)
 - Chez le veau : 1 g par jour pendant 7 jours
 - Chez d'adulte : 2 à 4 g par jour pendant 7 jours

Chez les animaux présentant une carence sévère en zinc, la réponse à la supplémentation en zinc est rapide et spectaculaire (Miller 1970). De manière expérimentale, la supplémentation chez des veaux, sévèrement carencés, avec un régime contenant 260 ppm de zinc a permis d'améliorer les états de léthargie en 1 jour, la consommation d'aliments a augmenté en 2-3 jours et la peau s'est améliorée en 4 jours. Au bout de 2 semaines, des poils sont apparus dans les zones d'alopécie (Miller, Miller 1962).

2.2.3.3 La carence en iode

Les bovins sont moins sensibles que les ovins et les caprins aux carences en iode. Les phénomènes de recyclage et de stockage de l'iode engendrent des délais très variables d'apparition des signes cliniques lors de carence. Le jeune veau est plus sensible que les adultes (Brulle 2008). La majorité des signes cliniques de carences en iode sont ceux de l'hypothyroïdie (diminution du métabolisme de base, faiblesse musculaire, chute de la production laitière...). Ils seront accentués lors de période froide (Rollin 2002).

a. Signes cliniques chez le veau

- *Goitre* : L'hypertrophie de la thyroïde est le signe clinique le plus spécifique lors de carence en iode. Il se rencontre chez les veaux nouveau-nés issus de mères très carencées (depuis des mois voire des années). Chez les bovins adultes, le goitre est plus rare (Lamand 1991). Lors de carence en iode, la T4 est produite en quantité insuffisante pour avoir une rétroaction négative sur l'axe hypothalamo-hypophysaire. Ainsi, l'augmentation de la concentration sanguine en TSH engendre une hypertrophie de la thyroïde (Hostetler, Kincaid, Mirando 2003). En réaction au déficit en iode, l'épithélium folliculaire va s'épaissir au détriment du colloïde (Lamand 1991). La thyroïde peut être palpable en région laryngée, sous la peau (Guyot, Rollin 2007). Elle est alors semblable à une masse de la taille d'un poing, mobile et légèrement dépressible. Dans les cas plus avancés, la thyroïde peut être également invisible à l'œil nu. Chez le jeune, le goitre est souvent associé à des troubles du pelage (alopécie, épaissement cutané...). Généralement, les veaux goitreux naissent avec un manque de vitalité, présentent des difficultés pour téter et sont plus sensibles aux agents infectieux (Lamand 1991).
- *Insuffisance en surfactant dans les poumons* : L'iode joue un rôle essentiel dans le développement fœtal et notamment dans le développement des poumons. De plus, les hormones thyroïdiennes permettent la maturation du système de surfactant. Les pneumocytes de type II possèdent des récepteurs aux hormones thyroïdiennes. La T3 permet alors une production de surfactant de qualité. Une carence en T3, lors de déficit en iode, est à l'origine d'une diminution de production du surfactant. L'atélectasie pulmonaire engendre une hypoxémie impliquant à terme une mauvaise oxygénation des tissus de l'organisme et une acidose métabolique (Rollin, Guyot 2003). D'après Guyot et al (2004), une carence en iode (et en sélénium), serait associée à un défaut de maturation pulmonaire conduisant à une insuffisance primaire en surfactant chez le veau nouveau-né à terme, responsable du syndrome de détresse respiratoire aiguë, fréquent en race Blanc Bleu Beige. Les veaux présentent de la tachypnée et de la tachycardie dans les 12 à 24 heures de vie.

- *Thermorégulation* : Les hormones thyroïdiennes jouent un rôle important dans la thermorégulation. Alexander et al (1970) ont montré, chez des agneaux nouveau-nés, que la thyroïdectomie réduit la thermogénèse lors d'exposition au froid. Ainsi, une carence en iode et en sélénium pourrait être à l'origine d'une sensibilité accrue au froid chez les nouveau-nés (Donald et al. 1994; Arthur et al. 1991).

b. Signes cliniques chez l'adulte

Les principaux signes cliniques chez l'adulte lors de carence en iode sont des troubles de la production. Le déficit en iode conduit à une hypothyroïdie. Cette dernière peut engendrer une perte d'appétit. On aura alors une diminution de la production laitière chez les vaches et des troubles de la croissance chez les jeunes bovins. Ces signes cliniques sont d'autant plus importants lors de carence secondaire en iode dû à une ingestion prolongée d'aliments riches en goitrigènes (Suttle 2010).

En termes de reproduction, la fonction ovarienne et la synthèse des hormones sont diminuées lors d'hypothyroïdie consécutive à une carence en iode. Les femelles ont alors des cycles sexuels irréguliers, des œstrus anovulatoires (baisse de la fertilité) et même être en anœstrus. La carence en iode peut provoquer des avortements à tous les stades de gestation par l'altération des fonctions thyroïdiennes du fœtus (Meschy 2017; Hidiroglou 1979). Si la femelle mène à terme sa gestation, des anomalies du développement et de la croissance du fœtus peuvent se produire (Francoz, Couture 2014). Le veau carencé peut naître faible ou mort et parfois sans poils (Rollin 2002). Des troubles du développement cérébral sont rapportés chez les agneaux carencés (Meschy 2017; Suttle 2010). Les carences prédisposent les femelles aux rétentions placentaires (Hidiroglou 1979; Rollin 2002).

c. Traitements préventifs et curatifs

Il faut veiller à couvrir les besoins en iode par une supplémentation minérale appropriée. Les aliments goitrigènes doivent être retirés de la ration ou être distribués en très faible quantité pour prévenir les carences secondaires en iode.

Généralement, le traitement parentéral n'est pas recommandé car l'ajout d'iode dans la ration permet de rétablir rapidement le niveau d'iode plasmatique (1 à 2 jours). En cas de besoin, on peut utiliser de l'iodure de potassium avec 350 mg/animal adulte/semaine par voie orale (Francoz, Couture 2014). Chez le veau, le goitre peut être traité avec 2,5 mg d'iode par jour dilué dans le lait (soit 2 gouttes/jour de teinture d'iode Codex) pendant 8 jours.

2.2.3.4 La carence en sélénium

Les fourrages français sont largement déficitaires en sélénium (Lamand, Périgaud 1973). Les élevages allaitants valorisent de manière importante le pâturage et les foins produits sur ces parcelles. Les signes cliniques liés à une carence en sélénium sont alors très souvent rencontrés en élevage allaitant.

a. Signes cliniques chez le veau

- *Myopathie (maladie du muscle blanc ou syndrome de myopathie-dyspnée)* : Chez le veau, une carence en sélénium, associée très souvent à une carence en vitamine E, engendre une dégénérescence des fibres musculaires ou de groupes de muscles. La dégénérescence des myocytes résulte probablement des dommages dus à l'accumulation de radicaux oxygénés libres (Meschy 2017). Généralement, les jeunes âgés de 1 à 2 mois et de race hypervieilles sont préférentiellement atteints. Les signes cliniques peuvent également apparaître chez des bovins avec un rumen fonctionnel lors de la mise à l'herbe. Les lésions musculaires peuvent toucher le système locomoteur, le système respiratoire et le système cardiaque. Le veau présente de manière précoce les signes caractéristiques suivant : une position de « miction », le dos voussé et la queue légèrement relevée (Cf. Figure 17).

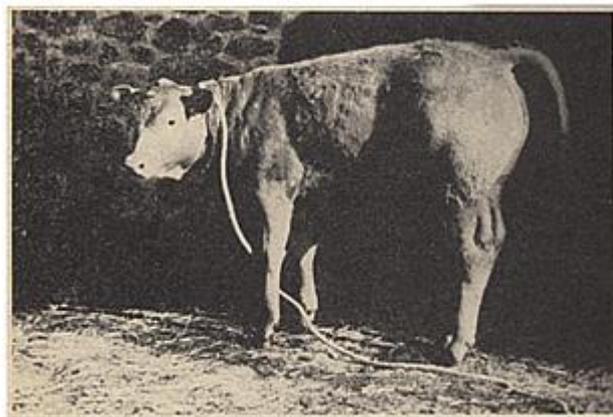


Figure 17 : Veau myopathique (attitude voussée et rassemblée caractéristique) (Lamand 1966)

Les animaux ont des difficultés à se déplacer, la station debout est douloureuse. Ils marchent sur la pointe des onglons avec les membres engagés sous eux. En début d'évolution, des trémulations rapides et intermittentes de différents muscles sont visibles au toucher. À des stades plus avancés, les trémulations deviennent permanentes, sur les masses musculaires contractées, et s'arrêtent en position couchée (contrairement aux crises tétaniques). La station debout étant trop douloureuse, les veaux restent alors en décubitus latéral. Ils auront alors des difficultés pour accéder aux trayons de leur mère mais également pour déglutir (Lamand 1991; Rollin, Guyot 2003).

Les veaux carencés présentent également une dyspnée. La respiration est courte, rapide, haletante, les nasaux sont dilatés et la paroi abdominale est mobilisée dans les mouvements respiratoires. Les jeunes présentent également de la tachycardie et une insuffisance cardiaque (Cf. *Figure 18*) (Lamand 1991). Une carence en sélénium peut également être associée au syndrome de détresse respiratoire fréquent chez les veaux de race Blanc-Bleu-Beige (Guyot et al. 2009). La maladie évolue rapidement vers la mort.

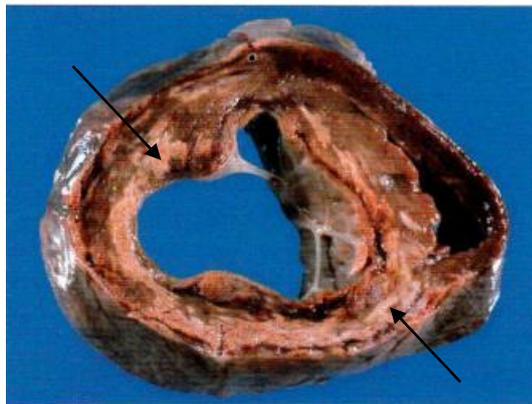


Figure 18 : Lésions cardiaques causées par une carence en sélénium/vitamine E sur le cœur d'un veau de 2 mois en coupe transverse présentant des foyers de nécrose blanchâtre du muscle cardiaque au niveau du septum et du ventricule gauche (Francoz, Nichols, Schelcher 2017)

- *Immunodépression* : Le sélénium joue un rôle très important dans le système immunitaire (système antioxydant, amélioration de la fonction phagocytaire des neutrophiles et implication dans la migration des neutrophiles et des macrophages...). Ainsi, lors de carence en sélénium, les diarrhées néonatales et des échecs de vaccinations sont plus fréquents (Enjalbert 2009b). De plus, le statut carencé des vaches augmente le risque que leurs veaux présentent une immunodépression et soient plus sujets aux maladies infectieuses (Enjalbert, Lebreton, Salat 2006).

b. Signes cliniques autour de la reproduction chez l'adulte

Les carences en sélénium (associées à des déficits en vitamine E) sont caractérisées chez l'adulte par des troubles de la reproduction. Le sélénium joue un rôle dans la folliculogénèse et dans la protection des ovocytes contre les dommages cellulaires (Van Emon, Sanford, McCoski 2020). Une carence en sélénium peut conduire à une fertilité réduite (Hidiroglou 1979). Harrison et al (1984) ont observé que les kystes ovariens étaient moins fréquents (19 % contre 47 %) après une injection de sélénium chez des vaches laitières recevant une ration pauvre en sélénium. Lors de la gestation, un déficit en sélénium peut avoir un impact sur la progestérone et faire augmenter le nombre d'avortement dans un élevage (Xiao et al. 2021). Enjalbert, et al (2006) expliquent également qu'une diminution de l'immunité liée à un déficit en sélénium chez les mères augmente le risque d'avortement infectieux. On peut également avoir des mise-bas prématurées (Rollin 2002).

En péripartum, les carences en sélénium et vitamine E réduisent l'activité des enzymes anti-oxydantes et exposent les vaches aux rétentions placentaires et aux mammites. Les neutrophiles sont également touchés par cette baisse de défense anti-oxydante. Leur capacité à phagocyter les agents pathogènes dans la glande mammaire est réduite (Xiao et al. 2021; Spears, Weiss 2008; Libera et al. 2021). La prévalence et la gravité des mammites sont alors augmentées (Rollin 2002). L'implication du sélénium en synergie avec la vitamine E dans la prévention des mammites est connue depuis des dizaines d'année. Enfin, de nombreuses études ont montré une corrélation entre la carence en sélénium et les rétentions placentaires (Van Emon, Sanford, McCoski 2020). Une augmentation de la fréquence des métrites est également rapportée (Lequeux 2016; Rollin 2002).

c. Traitements préventifs et curatifs

La prévention du syndrome de myopathie-dyspnée passe avant tout par une alimentation adéquate des mères. La supplémentation des mères en sélénium (et en vitamine E) est relativement importante en fin de gestation (Enjalbert et al. 1999). Elle va également permettre de prévenir les rétentions placentaires et les mammites.

En cas de syndrome de myopathie-dyspnée chez le veau, un traitement peut être mis en place. Une injection sous-cutanée de 0,1 mg de Se/kg PV accompagnée d'un apport alimentaire adéquat permet d'aider les veaux myopathiques. Lors d'une affection aiguë, l'état général de l'animal s'améliore sur une période de 3 à 5 jours. Un traitement anti-inflammatoire peut également être mis en place pour soulager les douleurs (Francoz, Nichols, Schelcher 2017). Lamand (1991) propose comme traitement, 3 injections intramusculaires, à 1 ou 2 jours d'intervalle, de 3 mg de sélénium associé à 250 mg de vitamine E.

BILAN

Nous avons vu dans cette partie les signes cliniques présents lors de carences sévères en oligo-éléments. En France, on rencontre surtout des animaux en subcarence (Périgaud, Lamand 1973). Or, le diagnostic de subcarence est difficile à établir avec précision malgré son impact réel sur les performances d'un troupeau (Suttle 2010).

De plus, les oligo-éléments peuvent avoir des manifestations cliniques communes (Coïc, Coppenet 1989) (*Cf. Tableau 6*) et les carences se traduisent souvent par des symptômes multiples, discrets et peu spécifiques (Lamand, Périgaud 1973; Lequeux, Cesbron 2020). Les poly-carences sont systématiquement diagnostiquées chez les jeunes bovins (Lamand, Périgaud 1973). De manière pratique, la recherche de carences est basée sur plusieurs oligo-éléments dans l'objectif d'établir une complémentation adéquate pour le troupeau.

Tableau 6 : Les manifestations cliniques communes lors de poly-carences en oligo-éléments (Coïc, Coppenet 1989)

	Cuivre	Zinc	Iode	Sélénium
Déficit de croissance ou d'engraissement	X	X	X	
Inappétence	X	X	X	
Infécondité	X	X	X	
Chute de la production laitière	X	X	X	
Boiteries	X	X		X

2.3 Manifestations cliniques et traitements lors d'excès

Les cas d'intoxications par les oligo-éléments chez les bovins sont rares. Elles peuvent survenir de manière suraiguë lors d'une erreur de supplémentation ou évoluer de manière chronique provoquant des signes cliniques et des lésions peu spécifiques.

Les traitements en cas d'intoxication sont difficiles à mettre en place. Si les signes cliniques permettent d'établir un diagnostic d'intoxication, un traitement spécifique est disponible seulement pour le zinc et le cuivre (Neirinck, Pouliquen 2007).

2.3.1 L'excès en cuivre

Les cas d'intoxication au cuivre sont fréquents chez les ovins et les caprins mais beaucoup plus rare chez les bovins. Cela peut s'expliquer par une faible capacité d'élimination du cuivre hépatique par voie biliaire chez les ovins (NRC 2001). Il est donc fortement déconseillé de distribuer aux ovins des concentrés ou des minéraux riches en cuivre destinés aux bovins. Plus rarement, des cas d'intoxication au cuivre peuvent être rencontrés lors de carences très sévères en molybdène.

L'intoxication aiguë est rencontrée lors de surdosage thérapeutique, lors d'ingestion accidentelle de pédiluves à base de sulfate de cuivre ou de fongicides (bouillie bordelaise), de pâturage sur des sols riches en cuivre (anciens terrains vignobles traités avec de la bouillie bordelaise, épandage de lisier de porc) ou de végétaux traités (Meschy 2017; Neirinck, Pouliquen 2007). La dose toxique aiguë est de 200 à 800 mg/kg PV pour les bovins adultes, de 40 à 100 mg/kg PV chez le veau (Puls 1988). Les signes cliniques chez les ruminants sont résumés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Signes cliniques lors d'intoxication au cuivre chez les ruminants (Neirinck, Pouliquen 2007)

	Intoxication aiguë	Intoxication chronique
Temps de latence	12 à 24 h	Plusieurs semaines
Signes cliniques	Ptyalisme, diarrhée bleu-verdâtre et coliques Dyspnée et tachycardie Convulsions et postures anormales	Muqueuses jaunes Soif intense, dyspnée, polypnée, tachycardie Urine foncée rouge-brun
Espérance de vie	Mort en 24 à 48 h	Mort en 24 à 72 h

L'intoxication chronique est plus fréquente. Elle se produit lors d'ingestion d'un aliment contenant 100 ppm de Cu/kg de MS chez les bovins et 15 à 20 ppm chez le veau sur plusieurs semaines (Neirinck, Pouliquen 2007; Ensley 2020). À leur naissance, les veaux sont des monogastriques. Ils sont ainsi plus sensibles à un excès de cuivre dans leur ration que les bovins adultes (Auza 1983; Ensley 2020).

Le cuivre va s'accumuler dans le foie entraînant une hépatite aiguë. La libération massive de cuivre dans le sang responsable d'une crise hémolytique conduit en quelques heures à une mort certaine. Peu de temps avant la crise hémolytique, les animaux présentent des urines brunâtres (hémoglobinurie), des muqueuses ictériques (ictère hémolytique), du méléna, des lésions d'hémorragies (muqueuses, tube digestif, muscles, endocardie et épicaarde) et du sang de couleur chocolat (méthémoglobinémie) (Meschy 2017; Bradley 1993; Morgan, Grace, Lilley 2014).

Le traitement des animaux en crise hémolytique est voué à l'échec. Toutefois, avant la crise hémolytique, une réduction d'apport alimentaire en cuivre est possible, en distribuant des fourrages pauvres en cuivre ou en mettant les animaux au pâturage sur une herbe jeune dont le cuivre est moins digestible (Lamand 1991). De plus, l'accumulation hépatique du cuivre peut être contrôlée sans danger par la distribution de 13 mg de molybdène (sous forme de molybdate d'ammonium) et 3 g de soufre (en fleur) par kg de MS pendant 12 semaines (Meschy 2017; Auza 1983; Lamand 1991). Morgan et al (2014) ont également montré, chez les bovins, l'efficacité d'un apport à forte dose de molybdate (200 mg de molybdate de sodium/vache/jour) après arrêt de toute supplémentation en cuivre.

2.3.2 L'excès en zinc

L'intoxication au zinc chez les ruminants est relativement rare. Les intoxications aiguës se rencontrent lors d'ingestion accidentelle d'engrais ou de fongicides contenant de forte concentration en zinc. Le léchage de barrières galvanisées ou l'ingestion d'eau provenant de conduites galvanisées peut entraîner, chez les jeunes animaux, des intoxications chroniques (Neirinck, Pouliquen 2007).

La dose toxique aiguë par voie orale est supérieure à 1 g/kg PV et la toxicité chronique apparaît après ingestion de plus de 500 ppm de zinc pendant plusieurs semaines (Neirinck, Pouliquen 2007).

Les signes cliniques et lésions sont résumés dans le tableau 8. Une intoxication aiguë au zinc se caractérise par des douleurs abdominales associées à des diarrhées, une polyurie-polydipsie et des signes nerveux. Le traitement de l'intoxication aiguë est présenté dans le tableau 9 et comprend un traitement spécifique à base de calcium, des pansements digestifs, du charbon actif et des antispasmodiques.

Tableau 8 : Signes cliniques et lésions lors d'intoxication au zinc chez les ruminants (Neirinck, Pouliquen 2007)

	Intoxication aiguë	Intoxication chronique
Temps de latence	De quelques heures à quelques jours	Plusieurs semaines
Signes cliniques	Soif intense, diarrhée, coliques Muqueuses pâles ou ictériques Parfois tremblements et paralysie des extrémités Polyurie puis oligurie	Diarrhée Polyuro-polydipsie Baisse de croissance, anémie, pica, dépilations, œdèmes, insuffisance rénale, contractions musculaires en fin d'évolution
Espérance de vie	De quelques heures à quelques jours	Plusieurs semaines

Une intoxication chronique en zinc va provoquer une carence en cuivre (NRC 2001). Une supplémentation de la ration avec cet oligo-élément permettra de traiter cette intoxication chronique.

Tableau 9 : Traitement de l'intoxication aiguë au zinc chez les ruminants (Neirinck, Pouliquen 2007)

	Traitement	Posologie
Traitement spécifique	Calcium édétate de sodium (Calcium édétate de sodium Serb®), solution injectable (boîte de 10 ampoules de 10 ml à 500 mg/ampoule)	25 à 50 mg/kg/j dilué au demi dans une solution NaCl 0,9 % par voie IV 2 cures de 3 à 5 jours espacées de 6 jours
Traitement symptomatique	Pansement digestif Antispasmodique Xylazine	5 à 10 mg/100 kg par voie IV 10 à 20 mg/100 kg par voie IM
Traitement éliminatoire	Charbon activé Diurèse neutre forcée Furosémide	250 à 500 g par voie orale NaCl 0,9 % ou lactate de Ringer ou Glucose 5 % : 10 à 25 ml/kg/h 0,5 à 2 mg/kg

2.3.3 L'excès en iode

En France, le seuil de toxicité pour l'iode est tellement éloigné des apports journaliers recommandés que les cas d'intoxications graves sont très rares. Un taux d'iode 10 fois

supérieur aux recommandations est nécessaire pour conduire à une intoxication (Cf. Tableau 2). Seuls des cas d'accidents d'origine iatrogène sont rapportés aux Etats-Unis lors d'utilisations excessives d'EDDI (éthylène diamine dihydroiodure) dans le traitement de maladie bactérienne chronique causé par l'actinomyose (Meschy 2017).

Lors d'excès ou de carence, l'animal présente les mêmes symptômes : hypothyroïdie fonctionnelle (inhibition de la synthèse de T3), goitre et blocage de la sécrétion des hormones thyroïdiennes. Des signes peu spécifiques sont également rapportés : anorexie, toux, jetage, ptyalisme, conjonctivite, et parfois des avortements. Lors d'intoxication chronique, on peut avoir des pelades et une baisse de l'immunité (Meschy 2017; Neirinck, Pouliquen 2007).

Aucun traitement n'est disponible.

2.3.4 L'excès en sélénium

Le sélénium est l'oligo-élément essentiel le plus toxique (Suttle 2010). Un apport en excès peut alors avoir des conséquences graves chez les bovins. L'intoxication chronique a lieu lorsque les animaux pâturent sur des sols riches en sélénium (Etats-Unis, Canada, Chine, Inde...) où poussent en grande quantité des plantes accumulatrices (Meschy 2017; Suttle 2010). En France, ce type d'intoxication est rarissime du fait de la faible teneur des sols et des fourrages en sélénium (Bellanger, Périgaud, Lamand 1973). L'intoxication aiguë lors d'erreur de supplémentation reste la cause la plus probable.

Les bovins peuvent présenter des signes cliniques dès que la ration contient plus de 5 mg de Se/kg de MS. La teneur dangereuse est de 11 mg de Se/kg de MS (Coïc, Coppenet 1989). Les signes cliniques sont résumés dans le tableau 10. À l'autopsie, on peut observer des lésions d'œdèmes pulmonaires, des épanchements thoraciques, péricardiques et abdominaux, des néphrites et une dégénérescence du myocarde. Le diagnostic clinique est difficile à établir. Enfin, il n'existe pas d'antidote. Ainsi, le traitement des formes aiguës est impossible. Lors d'intoxication chronique, une ration riche en protéines soufrées est fortement conseillée (Neirinck, Pouliquen 2007).

Tableau 10 : Signes cliniques lors d'intoxication au sélénium chez les ruminants (Neirinck, Pouliquen 2007)

	Intoxication aiguë	Intoxication subaiguë	Intoxication chronique
Temps de latence	1 à 24 heures	Apparition soudaine après plusieurs semaines	Plusieurs semaines
Signes cliniques	Dyspnée, jetage nasal et ptyalisme, tachycardie, tachypnée, anorexie Choc Chute spectaculaire de production laitière	Anorexie, coliques puis ataxie, dyspnée et cécité	Anorexie, apathie, alopecie, croissance dystrophique des onglons, boiteries, embryo-toxicité
Espérance de vie	1 à 2 jours	Plusieurs jours	Plusieurs semaines

2.4 Seuils de carence et de toxicité d'oligo-éléments pour les bovins adultes

Le tableau 11 résume les apports journaliers recommandés en fonction des seuils de carence et de toxicité pour les bovins allaitants. La teneur maximale autorisée est également indiquée. Avec cette réglementation, les cas d'intoxication chez les bovins sont rares. Cependant, les faibles teneurs en oligo-éléments des fourrages et la difficulté de compléter les animaux au pré augmentent la fréquence des carences chez les bovins allaitants.

Tableau 11 : Apport journalier recommandé, seuils de carence et de toxicité et teneurs maximales autorisées en cuivre, zinc, iode et sélénium pour les bovins adultes (en mg/kg de MS de la ration) (INRA 1988; Meschy 2007; Règlement (CE) n° 1831/2003 ; Règlement (CE) n° 1459/2005)

Oligo-éléments	Seuil de carence	Apport journalier recommandé	Seuil de toxicité	Teneur maximale réglementaire
Cuivre	7	10	30	Bovins avant le début de la rumination : 15 Autres bovins : 30
Zinc	45	50	250	120
Iode	0,15	0,5	8	Ruminants laitiers : 5 Autres bovins : 10
Sélénium	0,1	0,1	0,5	0,5

3 L'évaluation du statut en oligo-éléments en élevage bovin

3.1 L'évaluation du statut des animaux

En pratique, l'évaluation du statut en oligo-éléments chez les bovins est réalisée soit pour explorer une hypothèse diagnostique d'un ou de plusieurs trouble(s) pathologique(s) ou zootechnique(s) identifiés dans un élevage, soit pour connaître le statut physiologique en oligo-éléments d'un lot homogène d'animaux afin d'assurer la supplémentation en vue de prévenir les maladies et d'optimiser les performances zootechniques (Lequeux, Cesbron 2020).

Le statut en oligo-éléments des animaux dépend de l'apport alimentaire mais également de la digestion et du stockage des minéraux qui peuvent être affectés par des interactions avec d'autres constituants alimentaires (Enjalbert, Lebreton, Salat 2006) (Cf. *Tableau 5*).

Une évaluation efficace du statut en oligo-éléments nécessite donc de recueillir une anamnèse et des commémoratifs complets, de connaître la quantité et la composition de la ration distribuée ainsi que la supplémentation en minéraux et vitamines.

3.1.1 Les prélèvements sur les bovins

Sur le terrain, le plasma et le sérum sont couramment utilisés car ils sont très faciles à obtenir et leurs méthodes d'analyses sont validées (Ensley 2020; Lequeux, Cesbron 2020).

Les dosages d'oligo-éléments peuvent également être réalisés à partir d'autres matrices biologiques : urine, lait, poils et organes (foie, thyroïde) (Cf. *Tableau 12*).

3.1.1.1 Les prélèvements sanguins

Pour l'évaluation du statut en oligo-éléments, les vétérinaires praticiens réalisent, de façon très courante, des prélèvements sanguins. Cette méthode de prélèvement est rapide, facile et peu invasive pour l'animal. Elle nécessite cependant une contention appropriée des animaux.

Généralement, les bovins adultes sont prélevés à la veine coccygienne et les veaux, à la veine jugulaire. Dans la zone de ponction, la peau et les poils doivent être propres pour limiter au maximum les contaminations par les matières fécales (notamment pour le cuivre, le zinc et le sélénium) (Herold et al. 2020).

En ce qui concerne le matériel, il est utilisé de manière classique :

- Une aiguille de diamètre important (18 G) ;
- Un porte-aiguille de type Vacutainer® ;
- Pour les analyses sur sang total ou sur plasma : un tube héparinate de lithium Vacutainer® (Cf. *Figure 19*) (la majorité des analyses d'oligo-éléments sont réalisées avec ce type de tube ; éviter les tubes EDTA qui peuvent interférer avec les dosages (Lequeux 2017)) ou un tube d'héparinate de lithium oligo-éléments à billes de type Sarstedt Monovette® (Cf. *Figure 20*) ;
- Pour les recherches sur sérum : un tube sec Vacutainer®.



Figure 19 : Tube héparinate de lithium Vacutainer® (www.franceneir.com)



Figure 20 : Tube d'héparinate de lithium oligo-éléments à billes de type Sarstedt Monovette® (www.synlab.ch)

Lors du prélèvement, le sang doit s'écouler rapidement, sans interruption et remplir au maximum le tube. Les tubes avec anticoagulants doivent être homogénéisés par retournements lents (8 à 10 retours) après le prélèvement.

Les laboratoires d'analyses renseignent généralement le type de tube à utiliser (Cf. *Annexe 1*). Certains proposent des kits pour réaliser les prélèvements avec le matériel nécessaire. Il est conseillé aux vétérinaires de s'adresser directement au laboratoire d'analyses avant de réaliser les prélèvements pour connaître le matériel à utiliser et les modalités de prélèvement et d'envoi.

La fiche de demande d'analyse accompagnant les prélèvements doit renseigner une anamnèse et les commémoratifs complets (type de ration, supplémentation minérale ou non, affections et/ou signes cliniques).

3.1.1.2 Autres matrices pour l'évaluation du statut en oligo-éléments

Il existe d'autres matrices d'analyses que le plasma pour évaluer le statut en oligo-éléments d'un troupeau. Cependant, elles sont très peu utilisées sur le terrain (Cf. *Tableau 12*). Peu de laboratoires proposent ce type d'analyse pour le dosage des oligo-éléments et les techniques de prélèvement ne sont pas toujours faciles et rapides à mettre en place. Par exemple, les biopsies de foie nécessitent du matériel spécifique et un temps de préparation chirurgicale (tonte, asepsie, anesthésie locale...) (Swecker 2014).

Tableau 12 : Autres matrices prélevées chez les bovins pour l'évaluation du statut en oligo-éléments

Matrice d'analyse	Intérêts	Limites	Remarques
Lait	<ul style="list-style-type: none"> • Matrice intéressante pour le sélénium et l'iode uniquement (1) • Intéressant en élevage laitier 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de laboratoires la proposent 	<ul style="list-style-type: none"> • Pour le Se : la concentration dans le lait est environ 3 à 5 fois plus faible que celle dans le plasma. Cette concentration dans le lait augmente dans les 10 jours suivant la supplémentation • Pour l'I : bon marqueur nutritionnel, très bien corrélé aux apports (à prendre en compte : produit de trempage iodé, saison, niveau de production)
Urines	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de prélèvement • Pour le Se : bon reflet de l'apport en sélénium et du statut sélénié 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de laboratoires la proposent • Facteurs de variation pour l'interprétation : volume, densité urinaire, emploi de diurétique... (1) 	<ul style="list-style-type: none"> • Privilégier les prélèvements à la sonde pour limiter le risque de contamination
Organes	<ul style="list-style-type: none"> • Cu : la biopsie hépatique est un moyen plus précoce et donc plus sensible d'évaluer la nutrition en cuivre que les concentrations sanguines (8) 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de laboratoires la proposent • Difficulté de prélèvement du vivant de l'animal (biopsie) 	<ul style="list-style-type: none"> • Se : intérêt non supérieur au dosage plasmatique • I : il suffit de déterminer le poids de la thyroïde. Chez le veau, le poids normal est de 6 à 6,5 g. Une carence en iode entraîne le plus souvent une augmentation au-delà de 10 g.
Poils	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de prélèvement 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de laboratoires la proposent • Sensibilité aux polluants endogènes (sébum, sueur) • Sensibilité aux polluants exogènes (poussières, matériels en acier galvanisé) • Variation des teneurs en OE en fonction des longueur, couleur (zinc d'après (2) et (5) et sélénium d'après (7)) et localisation du poil, de la saison, de la race, du sexe et de l'âge • Les teneurs en OE dans le poil ne reflètent pas le statut de l'animal et ne sont pas corrélés aux apports alimentaires (fabrication discontinue du poil) (3) • Faible reproductivité des résultats, difficulté d'établir des valeurs de référence 	<ul style="list-style-type: none"> • Adapté aux recherches toxicologiques (4) et (6)

(Lequeux 2017; Lequeux, Cesbron 2020; (1) Guyot, Rollin 2007; (2) Lamand 1991; (3) Combs 1987; (4) Gabryszuk, Sloniewski, Sakowski 2008; (5) Nougues, Lamand 1972; (6) Ensley 2020; (7) Christodouloupoulos et al. 2003; (8) Herdt, Hoff 2011)

Sur le terrain, le dosage des oligo-éléments est couramment réalisé à partir d'échantillons sanguins. Les mesures sur tissu hépatique, notamment pour le cuivre et le sélénium (Ensley 2020), sont généralement réservées pour des études expérimentales. Par la suite, nous nous focaliserons sur l'évaluation du statut en oligo-éléments à partir d'échantillons sanguins.

3.1.2 Le choix des animaux

L'objectif est d'évaluer le plus précisément possible le statut en oligo-éléments du troupeau. Cependant, les concentrations en oligo-éléments dans le sang sont sujettes à de multiples sources de variation biologique. En conséquent, prélever plusieurs animaux permet de réduire ces effets de variation (Herdt, Hoff 2011). Cependant, au vu du coût des analyses, tout le troupeau ne peut pas être prélevé. Un échantillonnage doit donc être réalisé de manière représentative (Brulle 2008).

Selon les auteurs, il convient de prélever entre 5 et 15 animaux (Lequeux, Cesbron 2020; Lequeux 2017; Chorfi 2013; Ensley 2020; Herdt, Hoff 2011). Pour une question de praticité et d'économie dans la réalisation des prélèvements de routine, un nombre réduit d'animaux sera sélectionné. La plupart des laboratoires français (Iodolab, LEAV 85, LABOCEA 35, Obione, laboratoire ELCDF...) proposent des forfaits d'analyses à partir de 5 prélèvements sanguins.

Il faut alors choisir les animaux les plus représentatifs du troupeau. La sélection se portera sur les animaux cliniquement sains, pour limiter les effets du stress et des phénomènes inflammatoires sur les résultats d'analyse (Lequeux 2017; Lequeux, Cesbron 2020). Les animaux choisis seront regroupés par lot homogène suivant l'âge pour les veaux et le stade physiologique et de lactation pour les adultes : génisses, vaches en début de lactation, milieu de lactation, fin de lactation, tarissement. Pour connaître le statut en oligo-éléments d'un groupe en vue d'adapter la supplémentation, les animaux du lot devront consommer la même ration au moment du prélèvement. Si l'objectif est de réaliser un examen complémentaire pour supplémenter des animaux présentant des troubles pathologiques (diarrhées néonatales par exemple), les animaux seront sélectionnés sur la base du type d'affection ou des symptômes en commun (Lequeux, Cesbron 2020).

Quelques précautions supplémentaires sont à prendre en compte. La plupart des données actuelles de la littérature et des laboratoires sont obtenus à partir de dosage sur des animaux de plus de 2 mois. Ainsi, les analyses sur les veaux nouveau-nés sont parfois compliquées à interpréter. De plus, durant la phase du péripartum, les vaches sont soumises à un grand stress, un état inflammatoire important et des changements hormonaux. Avant le vêlage, les vaches peuvent être prélevées sans induire de biais sur les résultats d'analyse. Cependant, les vaches fraîchement vêlées et jusqu'à 1 mois post-partum seront écartées pour l'échantillonnage du troupeau. Enfin, certains médicaments à base d'iodure de sodium (voie parentérale) utilisés dans le traitement de l'actinomyose, ou à base d'iodure de

potassium (voie orale) utilisés dans le traitement des laryngites striduleuses et les antiparasitaires à base de closantel et de nitroxinil contiennent de l'iode et peuvent modifier les concentrations plasmatiques temporairement. Les animaux ayant reçu ce type de traitement seront à écarter le temps de l'élimination de la molécule (se référer aux temps d'attente des médicaments) (Lequeux, Cesbron 2020; Guyot, Rollin 2007).

Pour réduire encore le coût, des analyses en mélange peuvent être réalisées. Cependant, le lot choisi doit être le plus homogène possible. L'hétérogénéité des statuts au sein d'un troupeau risque d'être fortement masquée lors d'analyse en pools. L'interprétation ne sera alors possible qu'avec des valeurs très basses (carences sévères) ou très élevées (intoxication) (Lequeux, Cesbron 2020; Brulle 2008).

3.1.3 Les conditions pré-analytiques et de conservation des échantillons

En plus des facteurs de variation intra-troupeau, les conditions de prélèvement ainsi que la conservation des échantillons et l'acheminement jusqu'au laboratoire peuvent influencer les valeurs des concentrations plasmatiques et sériques en oligo-éléments. L'objectif est d'obtenir des échantillons de qualité maximale pour minimiser les erreurs de dosage. Pour cela, des précautions sont à prendre.

L'hémolyse est un facteur pré-analytique influençant fortement les valeurs du zinc (et du fer). Dans les prélèvements hémolysés, les concentrations plasmatiques du cuivre, du sélénium et de l'iode ne sont peu ou pas modifiées (Lequeux, Cesbron 2020; Larrán et al. 2021). Les concentrations en zinc sont 5 fois plus élevées dans les hématies que dans le plasma (Lamand 1976). Le zinc, contenu dans les enzymes érythrocytaires (tel que la SOD) est libéré lors de la rupture des hématies, faisant augmenter sa concentration plasmatique. Larrán et al. (2021) ont montré qu'un degré d'hémolyse modéré (> 1,74 g Hb/L) conduit à surestimer les concentrations sériques de zinc. L'hémolyse peut être liée à la technique de prélèvement (écoulement trop lent ou turbulent du sang dans les tubes), au délai d'acheminement trop important (sang total), ou à une quantité insuffisante de plasma (Lequeux, Cesbron 2020). Le vétérinaire veillera à respecter les précautions de prélèvement et les conditions d'envoi au laboratoire d'analyses.

Après prélèvement, les tubes doivent être conservés sous couvert du froid positif jusqu'à leur arrivée au laboratoire d'analyses.

Actuellement, le plasma et le sérum sont les matrices les plus utilisées pour les dosages d'oligo-éléments. En France, les laboratoires utilisent préférentiellement le plasma (Lequeux, Cesbron 2020). Cependant, quasiment toutes les données disponibles dans la littérature concernant les concentrations en oligo-éléments physiologiques chez les bovins se réfèrent au sérum (Larrán et al. 2021; Puls 1988; Herdt, Hoff 2011). Luna et al. ont montré

en 2019 que, chez les bovins, les échantillons de plasma et de sérum sont interchangeables pour la plupart des oligo-éléments sauf pour le cuivre et le sélénium. Les concentrations de cuivre sont significativement plus élevées dans le plasma que dans le sérum (Luna et al. 2019). Le sang total est utilisé seulement pour la mesure de la glutathion peroxydase érythrocytaire.

Pour les échantillons de sérum et de plasma, il est fortement recommandé de centrifuger les tubes avant de les envoyer (12 000 tours par minute pendant 5 minutes). Il faudra attendre au moins 30 minutes pour qu'un caillot se forme avant de centrifuger les tubes secs pour le sérum. Après centrifugation, le surnageant (sérum ou plasma) est pipeté sans hématie et placé dans un tube sec et chimiquement propre. L'idéal serait de centrifuger les tubes à la ferme (Lamand 1976). Cependant, tous les vétérinaires ne sont pas équipés de centrifugeuse transportable et fonctionnant dans les véhicules. Pour optimiser la qualité des échantillons, Chorfi (2013) propose un temps minimal à respecter entre le prélèvement et la centrifugation :

- Tubes secs (sérum) : centrifugation dans les 24 heures après prélèvement si conservation à + 4 °C ou 1 heure après à température ambiante (20 à 24 °C)
- Tubes héparinés (plasma) : centrifugation dans les 4 heures après prélèvement

En général, le sérum et le plasma peuvent être conservés 7 jours à + 4 °C et 2 à 4 semaines à - 20 °C, sans trop de variations pré-analytiques (Chorfi 2013).

Les tubes sont acheminés dans les 24 heures et au maximum dans les 48 à 72 heures qui suivent la prise de sang sous couvert du froid positif (Lequeux 2017). L'envoi des prélèvements doit alors se faire en début de semaine.

3.1.4 Les méthodes de dosage des oligo-éléments dans le sang

En France, un grand nombre des dosages d'oligo-éléments est effectué sur plasma. Il existe actuellement deux grandes méthodes instrumentales couramment utilisées dans les laboratoires : la spectrométrie de masse (MS) couplée à un plasma induit par haute fréquence (ICP) ou ICP-MS et la spectrométrie d'émission optique (AES) couplée à un plasma induit par haute fréquence (ICP) ou ICP-AES. Ces deux méthodes mesurent les concentrations plasmatiques en oligo-éléments.

L'ICP-MS est une méthode d'analyse rapide, sensible, précise et qui permet de mesurer plusieurs oligo-éléments simultanément (Ensley 2020; Herdt, Hoff 2011). Elle peut mesurer des concentrations plasmatiques comprises entre 0,1 µg/L et 100 µg/L (Lequeux, Cesbron 2020). Elle permet de séparer, d'identifier et de quantifier les oligo-éléments présents dans un échantillon de sang en fonction du rapport de leur masse à leur charge (Lequeux, Cesbron 2020; Lumet, Negriolli 2007) (*Cf. Annexe 2*).

L'ICP-AES est une méthode d'analyse plus ancienne et qui présente un niveau de quantification un peu moins performant que l'ICP-MS (Lequeux, Cesbron 2020).

De manière plus classique, le cuivre et le zinc sont dosés par spectrométrie d'absorption atomique de flamme, le sélénium par spectrométrie d'absorption atomique à four électrothermique et l'iode par colorimétrie (Lumet, Negriolli 2007).

Une méthode de mesure des oligo-éléments dans le sang consiste à doser l'activité des enzymes ou des molécules spécifiques contenant l'élément minéral (Ensley 2020; Meschy 2017). La glutathion peroxydase est couramment utilisée comme marqueur du statut sélénique chez les bovins. Pour le cuivre, le dosage de l'activité enzymatique de la céruloplasmine ou de la SOD serait intéressant mais le coût limite leur utilisation sur le terrain (Hall 2005). L'interprétation des résultats du dosage des hormones thyroïdiennes est délicate car de nombreux facteurs de variation autre que le statut iodique des animaux interviennent : stade physiologique (valeurs plus faibles en début de lactation), état de stress métabolique ou thermique (valeurs élevées lors de température froide)... L'utilisation du dosage de l'activité enzymatique pour le zinc s'est révélée peu performante du fait de la variabilité individuelle et d'un effet âge important sur la phosphatase alcaline (Meschy 2017). Le tableau 13 donne des valeurs de références selon les seuils de carence pour les bovins adultes proposées dans la littérature.

Tableau 13 : Valeurs de référence de carence et de toxicité pour les bovins adultes proposées dans la littérature (¹SODE : Superoxyde dismutase érythrocytaire ; ²GSH-pxe : glutathion-peroxydase érythrocytaire ; ³IIP : teneur plasmatique en iode inorganique ; ⁴T4 : thyroxine ; ⁵SAA : spectrométrie d'absorption atomique) (Enjalbert, Lebreton, Salat 2006; Puls 1988; Guyot 2013)

Oligo-éléments	Marqueurs	Analyse	Seuil de carence (déficient)	Seuil de subcarence (marginal)	Plage physiologique (adéquat)	Références
Cuivre	Cuivre plasmatique (plasma hépariné)	SAA ⁵	< 8 µmol/L	8 à 11 µmol/L	11 à 18 µmol/L	(Enjalbert, Lebreton, Salat 2006)
	Céruloplasmine (sérum)	?	< 80 mg/L	90 à 120 mg/L	130 à 250 mg/L	(Puls 1988)
	SODE ¹ (plasma hépariné ou EDTA)	?	< 0,3 mg/g Hb		> 0,3 mg/g Hb	(Puls 1988)
Zinc	Zinc plasmatique	SAA ⁵	< 12 µmol/L	12 à 14 µmol/L	> 14 µmol/L	(Enjalbert, Lebreton, Salat 2006)
Iode	Iode total (plasma)	?	10 à 50 µg/L		100 à 400 µg/L	(Puls 1988)
	IIP ³ (plasma)	Technique de Aumont et de Tressol	< 50 µg/L	50 à 80 µg/L	> 80 µg/L	(Enjalbert, Lebreton, Salat 2006)
	T4 ⁴	Radio-immunologique sur plasma	< 60 nmol/L		> 60 nmol/L	(Enjalbert, Lebreton, Salat 2006)
Sélénium	Sélénium (sérum)	?	<65 µg/L	65 à 80 µg/L	80 à 140 µg/L	(Guyot 2013)
	GSH-pxe ² (sang total hépariné)	Colorimétrie, Paglia et Valentine	< 75 U/g Hb	75 à 150 U/g Hb	> 150 U/g Hb	(Enjalbert, Lebreton, Salat 2006)

Le tableau 14 nous indique que les concentrations physiologiques en oligo-éléments sont supérieures chez les adultes et les veaux en croissance par rapport à celles des nouveau-nés. Cependant, il convient de se référer directement aux valeurs de référence renseignées par les laboratoires sur les fiches de résultats d'analyse du fait de la grande variabilité en fonction de la méthodologie employée.

Tableau 14 : Intervalles de référence pour les concentrations physiologiques d'oligo-éléments chez les bovins dans le sérum et le sang total et pour la teneur plasmatique en iode inorganique chez les bovins adultes (Herdt, Hoff 2011)

	Analyse	Adultes et veaux en croissance	Nouveau-nés	Conversion des unités
Cuivre	ICP-MS	0,6 à 1,1 µg/mL	0,3 à 1,0 µg/mL	µmol/L = (µg/L)/63,5
Zinc	ICP-MS	0,6 à 1,9 µg/mL	0,6 à 1,75 µg/mL	µmol/L = (µg/L)/65,4
IIP	?	100 à 200 ng/mL (adultes)	-	nmol/L = (ng/L)/127
Sélénium	ICP-MS	65 à 140 ng/mL	20 à 70 ng/mL	nmol/L = (ng/L)/79
Sélénium sur sang total	ICP-MS	120 à 300 ng/mL	100 à 250 ng/mL	nmol/L = (ng/L)/79

3.1.5 Signification biologique des paramètres mesurés et interprétation des résultats

3.1.5.1 Le cuivre

Le cuivre est stocké dans le foie. La concentration plasmatique en cuivre résulte à la fois des apports alimentaires et des réserves hépatiques (Enjalbert, Alves de Oliveira, Lebreton 2009). Lors de carence alimentaire, le cuivre stocké va être libéré par le foie afin de maintenir une cuprémie dans les valeurs physiologiques pendant plusieurs semaines. La concentration plasmatique en cuivre va chuter après épuisement des réserves. Une cuprémie faible indique ainsi un épuisement des réserves associé à des apports alimentaires en cuivre insuffisant (Enjalbert, Alves de Oliveira, Lebreton 2009; Hall 2005; Suttle 2010; Herdt, Hoff 2011). La cuprémie est donc une mesure des carences alimentaires en cuivre à long terme (délai d'épuisement hépatique variable selon les individus ; environ 170 jours) (Lequeux 2017).

Les concentrations en molybdène sont également à surveiller. Les complexes de Cu-thiomolybdates rendent le cuivre indisponible pour les tissus. En présence de concentration plasmatique en molybdène élevée, une teneur plasmatique en cuivre dans les valeurs physiologiques est à considérer comme suspecte (Hall 2005). Avec un taux important de thiomolybdates circulants, la cuprémie peut être dans les valeurs de référence chez des

animaux carencés (Ensley 2020). Dans des régions connues pour leur richesse en molybdène, les mesures de cuprémie doivent être mises en parallèle avec celles du molybdène sanguin.

Un autre facteur peut également faire varier les teneurs plasmiqes en cuivre indépendamment des apports alimentaires. En cas d'infection ou d'inflammation, la cuprémie augmente suite à la mise en place du système de défense immunitaire de l'organisme (Meschy 2017). Cet effet est dû à une augmentation des concentrations sanguines en céruloplasmine, protéine de la phase aiguë de l'inflammation chez les bovins et cupro-dépendante (Molmy 2018; Herdt, Hoff 2011). Les concentrations de céruloplasmine peuvent augmenter lors de maladie inflammatoire (Ensley 2020; Herdt, Hoff 2011), un stress ou toute autre situation stimulant le système immunitaire (comme la vaccination) (Brulle 2008). Ainsi, en cas d'inflammation, des valeurs élevées en céruloplasmine ou en cuivre plasmatique peuvent masquer une carence en cuivre (Lequeux 2017).

3.1.5.2 *Le zinc*

Le zinc plasmatique est un indicateur sensible et précoce de la carence alimentaire en zinc (Lamand 1991; Enjalbert, Alves de Oliveira, Lebreton 2009). Cependant, des précautions sont à prendre pour limiter les contaminations lors du prélèvement (Lamand 1991). La rupture des hématies lors de l'hémolyse augmente significativement la concentration en zinc dans le prélèvement (Larrán et al. 2021). De plus, les bouchons en caoutchouc (riche en zinc) contaminent les prélèvements (Meschy 2017). Ce type de tube ne doit pas être utilisé pour les dosages en oligo-éléments.

En cas d'état inflammatoire, la zincémie diminue alors que la cuprémie va augmenter. Il faut donc interpréter parallèlement les concentrations plasmatiques en zinc et en cuivre. Une hypercuprémie associée à une hypozincémie doit orienter le diagnostic vers une maladie infectieuse ou inflammatoire (Lamand, Levieux 1981). Une concentration plasmatique en zinc peut également être liée à une hypoalbuminémie (Herdt, Hoff 2011; Ensley 2020).

3.1.5.3 *L'iode*

L'évaluation du statut en iode peut être réalisée par la mesure de l'iode total plasmatique, de la teneur plasmatique en iode inorganique (IIP) et de la thyroxine (T4).

La T4 permet d'évaluer la fonction thyroïdienne des animaux. Sa concentration sanguine résulte de la synthèse des hormones thyroïdiennes par la thyroïde et de sa désiodation en T3. Ainsi, sa synthèse dépend des apports alimentaires en iode, de la présence de facteurs antithyroïdiens dans la ration, du statut physiologique de l'animal et de l'état de stress métabolique (état inflammatoire, infection...) ou thermique. De plus, l'enzyme de désiodation de T4 en T3 est sélénio-dépendante. Une carence en sélénium peut alors affecter l'activation des hormones thyroïdiennes (thyroxinémie élevée dans les troupeaux carencés en sélénium) (Enjalbert, Alves de Oliveira, Lebreton 2009).

L'interprétation des valeurs de T4 est donc délicate. Il s'agit d'un indicateur peu spécifique des apports alimentaires en iode qui sera plutôt utilisé en cas de suspicion d'hypothyroïdie dans un troupeau (Lequeux 2017; Guyot, Rollin 2007).

L'IIP est un marqueur nutritionnel adéquat car elle varie rapidement (3 jours) avec les changements d'apports en iode par la ration. Cependant, elle ne fournit pas d'informations sur les réserves thyroïdiennes ni sur la fonction thyroïdienne. Elle reflète l'apport alimentaire en iode à court terme (Herdt, Hoff 2011; Lequeux 2017; Enjalbert, Alves de Oliveira, Lebreton 2009; Guyot, Rollin 2007). La mesure de l'IIP et de la T4 sont également délicates chez les veaux nouveau-nés. À la naissance, les concentrations de ces deux marqueurs sont supérieures à celles de leur mère (transfert placentaire). La IIP du veau diminue ensuite jusqu'à l'âge de 10 jours puis reste stable jusqu'à l'âge de 1 mois (Guyot, Rollin 2007).

L'iode total comporte l'iode inorganique et l'iode lié aux hormones thyroïdiennes (Guyot, Rollin 2007). Il est également un marqueur nutritionnel (Lequeux 2017). Cependant, l'iode total n'est pas un indicateur de choix lors du diagnostic de carence en iode car il est soumis aux variations des hormones thyroïdiennes. Une faible concentration plasmatique ne permet pas de conclure à une carence en iode. Les réserves thyroïdiennes peuvent être tout à fait normales lors de carence alimentaire à court terme (Herdt, Hoff 2011; Ensley 2020; Lequeux 2017).

3.1.5.4 Le sélénium

L'évaluation du statut en sélénium peut être réalisée par analyse de la teneur en sélénium sur sang total ou sur plasma et par analyse de l'activité enzymatique de la glutathion peroxydase (GSH-pxe) sur sang total (Hall 2005).

Cette enzyme est incorporée dans les hématies lors de leur fabrication (Hall 2005; Herdt, Hoff 2011; Pavlata et al. 2003; Guyot, Rollin 2007). La concentration érythrocytaire de la glutathion peroxydase dépend de la disponibilité alimentaire en sélénium (Herdt, Hoff 2011; Guyot, Rollin 2007). Étant donné que leur durée de vie moyenne chez les bovins est de 120 jours, l'activité de cette enzyme séléno-dépendante reflète les apports alimentaires en sélénium sur les mois précédents (Enjalbert, Alves de Oliveira, Lebreton 2009; Hall 2005; Pavlata et al. 2003). Lors de supplémentation récente, la mesure de la glutathion peroxydase n'est pas appropriée. Elle ne permet pas de détecter les carences débutantes en sélénium. De plus, la mesure de l'activité de la glutathion peroxydase est un indicateur fiable du statut en sélénium seulement chez les adultes. Chez les veaux nouveau-nés, l'activité enzymatique est supérieure à celle de leur mère au vêlage et diminue en grandissant (Koller, Whitbeck, South 1984; Counotte, Hartmans 1989; Enjalbert et al. 1999). L'interprétation est donc délicate chez les jeunes.

La concentration plasmatique en sélénium est sensible aux apports alimentaires récents (2 à 6 jours). Elle permet une détection précoce des carences en sélénium (Lequeux 2017; Swecker 2014; Guyot, Rollin 2007). Le sélénium plasmatique est donc un indicateur du

statut nutritionnel en sélénium récent alors que la GSH-pxe renseigne sur des apports alimentaires à long terme. Chez le veau nouveau-né, le sélénium est présent dans le pool érythrocytaire (Van Saun, Herdt, Stowe 1989). Les taux sériques en sélénium sont inférieurs à ceux des adultes, bien que la concentration dans le sang total soit similaire. Cette concentration sérique en sélénium reste basse chez les jeunes animaux durant la période d'alimentation lactée puis augmente dès que le veau consomme des aliments solides non carencés en sélénium (Guyot, Rollin 2007).

Le sélénium dans le sang total se compose du pool plasmatique et du pool érythrocytaire (GSH-pxe majoritairement). Ainsi, la concentration du sélénium dans le sang total va résulter des changements rapides liés aux apports alimentaires dans le plasma et de l'évolution à long terme du sélénium dans les érythrocytes. Le dosage de sélénium dans le sang total est plus précis que le dosage sur plasma. Cependant, ces deux méthodes sont correctes pour l'interprétation du statut nutritionnel du sélénium (Guyot, Rollin 2007).

Enfin, la source de supplémentation en sélénium est à prendre en compte dans l'interprétation des résultats de dosage. En France, et plus largement en Europe, des formes organiques (levure séléniée) et inorganiques (sélénite et sélérate) de sélénium sont autorisées pour compléter les bovins. Ortman et Pehrson (1999) ont observé, à dose égale de sélénium ingérée, que les concentrations plasmatiques en sélénium étaient supérieures pour les vaches ayant reçu de la levure séléniée par rapport à celles ayant consommé une forme inorganique de sélénium. Toutefois, quelle que soit la source de sélénium, la concentration plasmatique en sélénium atteint un plateau 4 semaines après le début de la supplémentation. Cela peut s'expliquer par une incorporation de la sélénométhionine contenue dans la levure séléniée de manière non spécifique dans les protéines. Le sélénium inorganique est incorporé seulement dans les protéines dépendantes du sélénium (Hall 2005). Le statut en sélénium est maintenu dans les valeurs physiologiques pour longtemps après l'arrêt de la supplémentation avec les sources organiques (Guyot, Rollin 2007).

Étant donné que le statut en oligo-éléments des animaux dépend de l'apport alimentaire, le dosage des oligo-éléments dans les fourrages peut venir compléter les analyses sanguines réalisées sur les animaux. Les analyses sanguines vont nous permettre d'identifier les éventuelles carences chez les animaux. De manière générale, ces carences sont dépendantes des apports déficitaires des fourrages.

3.2 Le dosage des oligo-éléments dans les fourrages d'herbe

3.2.1 Le prélèvement des fourrages

Les dosages des oligo-éléments dans les fourrages sont réalisés par de nombreux laboratoires français (Labocea 35, Laboratoire ELCDF, Laboratoire agronomique de Normandie, Agrolab's ...).

Des précautions sont à prendre lors du prélèvement des échantillons, du conditionnement, de la conservation et de l'envoi au laboratoire pour optimiser la qualité d'analyse. Avant de réaliser les prélèvements, le vétérinaire ou l'éleveur peut appeler le laboratoire pour connaître le protocole d'échantillonnage complet.

Il convient de prélever des lots homogènes de fourrage selon la parcelle d'origine, le mode de conservation (herbe verte, foin, enrubannage ou ensilage d'herbe) (Lequeux 2017). L'échantillonnage doit être le plus représentatif (Octavet 2022) :

- **Herbe verte** : dans une zone représentative de la parcelle (éviter les entrées, les zones riches en bouses...), prélever environ 1 kg d'herbe en la coupant 5 cm au-dessus du sol (pas de terre dans le prélèvement). Placer l'herbe dans un sachet propre, sec et hermétique et homogénéiser ;
- **Foin et enrubannage** : prélever des poignées (environ 500 g) de fourrage sur différentes bottes provenant d'une même parcelle ou directement sur la parcelle avant ramassage pour les foins ventilés. Placer le fourrage dans un sachet sec et hermétique et homogénéiser ;
- **Ensilage** : prélever des poignées (environ 1 kg) sur le front d'attaque frais en évitant les bords. Placer l'ensilage dans un sachet hermétique et homogénéiser.

La fiche de renseignements fournie par le laboratoire doit être remplie soigneusement pour chaque échantillon. Elle doit être placée à l'extérieur des sachets. Les échantillons sont ensuite envoyés en début de semaine et le plus rapidement possible après prélèvement au laboratoire d'analyses.

Pour les fourrages « humides » (taux d'humidité supérieur à 15 %), des précautions sont à prendre pour éviter les fermentations et l'échauffement dans les sachets lors du transport vers le laboratoire. Pour l'ensilage et éventuellement les foins ventilés avant séchage, une nuit au congélateur suffit à stabiliser les échantillons. Les fourrages verts peuvent être séchés à l'air libre ou séchés dans un four électrique à 50-60 °C maximum ou congelés.

3.2.2 Les méthodes de dosage des oligo-éléments dans les fourrages

Le dosage du cuivre et du zinc dans les fourrages est réalisé de manière beaucoup plus courante que le dosage de sélénium et d'iode.

Après réception par le laboratoire d'analyses, les échantillons sont broyés puis minéralisés. Plusieurs méthodes de dosage existent. Classiquement, le cuivre et le zinc sont analysés par spectrométrie d'absorption atomique (Bellanger 1971), le sélénium par fluorimétrie (Lamand 1969) et l'iode par spectrophotométrie automatisée de l'iodure basée sur la réaction de Sandell et Kolthoff (Bellanger, Tressol, Piel 1979).

Avec le développement des nouvelles méthodes d'analyses, les oligo-éléments dans les plantes sont de plus en plus déterminés par ICP-MS ou par ICP-AES (Guyot, Rollin 2007; Schlegel et al. 2016).

Pour des raisons économiques, les analyses d'oligo-éléments des fourrages sont souvent réservées à la recherche scientifique, notamment pour le sélénium et l'iode. Des outils simples permettent aux éleveurs et aux vétérinaires d'estimer les valeurs alimentaires et minérales des fourrages présents dans les fermes. Ils existent, par exemple, les tables de valeurs mises à disposition par l'INRAe : (INRAe 2019).

3.2.3 Les difficultés d'interprétation

Les analyses minérales des fourrages et leur comparaison avec les besoins des animaux sont une méthode efficace pour adapter la quantité et la nature de la supplémentation nécessaire (INRA 2018). Toutefois, en cas de carences et de signes cliniques, le dosage des oligo-éléments dans les fourrages est imprécis.

Les résultats d'analyses sont difficiles à interpréter pour différentes raisons :

- variation de la composition alimentaire et les quantités consommées, par exemple au pâturage ;
- nombreux facteurs environnementaux peuvent faire varier les concentrations ;
- variations importantes possibles selon les modes de distribution ou la forme d'apport des oligo-éléments (organique ou inorganique), le broyage, la digestibilité du fourrage et donc de la biodisponibilité des minéraux dans les aliments ;
- difficulté d'obtenir un échantillon représentatif de la ration consommée par les animaux ;
- contamination très facile lors du prélèvement (terre, outils de prélèvement), de la préparation et du stockage des échantillons (sachets) et pendant le dosage (broyage, matériel de dosage, réactifs...) ;

- analyse des rations complexes est impossible
- nombreuses interactions, parfois antagonistes, entre les nutriments (Cf. *Tableau 5*) pouvant induire des carences secondaires ;
- compétition possible entre les animaux pour la ration et les compléments minéraux et vitaminiques ;
- variations possibles de la valorisation de l'apport en fonction de l'état sanitaire des animaux mais aussi de l'âge ; (Lequeux 2017; INRA 2018; Guyot, Rollin 2007; Hall 2005; Herdt, Hoff 2011; Bellanger 1971).

L'évaluation du statut en oligo-éléments des animaux est une pratique répandue. Elle permet d'adapter de manière précise la complémentation minérale des animaux. Le dosage des micro-éléments dans les fourrages est généralement utilisé pour les travaux de recherches scientifiques. Par la suite, nous allons voir quels sont les facteurs de variation des teneurs en oligo-éléments dans les fourrages et comment appréhender ces teneurs sans analyses ?

4 Les oligo-éléments au sein du continuum sol-plante-animal permettent-ils de couvrir les besoins des bovins ?

4.1 La teneur en oligo-éléments dans les fourrages

La principale source d'oligo-éléments, pour les bovins, sont les fourrages qui puisent eux-mêmes leurs minéraux dans le sol (Martin 2007). Dans les années 1970, Bellanger, Périgaud et Lamand ont mis en évidence à partir d'une enquête nationale sur 1500 échantillons que les fourrages français avaient des teneurs en oligo-éléments inférieures aux recommandations journalières :

- **Cuivre** : 94 % des foins de prairies naturelles, de premières coupes, avaient des teneurs inférieures au seuil de carence (7 mg/kg de MS) et 45 % inférieures à 5 mg/kg de MS. Les concentrations se situent entre 2,8 et 8,9 avec une moyenne de 5,2 mg/kg de MS ;
- **Zinc** : 99 % des foins de prairies naturelles, de premières coupes, avaient des teneurs inférieures au seuil de carence (50 mg/kg de MS) et 30 % inférieures à 25 mg/kg de MS. Les concentrations se situent entre 13 et 60 avec une moyenne de 29,1 mg/kg de MS ;
- **Sélénium** : les teneurs moyennes dans les fourrages étaient de 0,05 mg/kg de MS pour un maximal de 0,11 mg/kg de MS. Il n'existe pas de toxicité par le sélénium en France.

Cette enquête montre que les fourrages français sont sub-carencés en cuivre, zinc, sélénium et molybdène.

Pour Alderman et Jones (1967), les prairies avec une prédominance en graminée ne peuvent pas fournir des quantités suffisantes en iode pour couvrir les besoins des vaches pendant la gestation et la lactation. En France, 42 % des foins de prairies permanentes sont carencés en iode avec des teneurs inférieures à 0,12 mg/kg de MS (Piel 1978). La moitié des fourrages ne permettent donc pas de couvrir les besoins des bovins adultes. C'est également le cas en Nouvelle Zélande. 87 % des pâturages contiennent une quantité insuffisante d'iode pour les bovins (entre 0,005 et 1,4 mg d'I par kg de MS avec une moyenne à 0,27 ppm) (Jensen et al. 2019).

De plus, les besoins en oligo-éléments chez les plantes diffèrent qualitativement et quantitativement par rapport à ceux des animaux (Martin 2007). Le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre, le molybdène (Fageria, Baligar, Clark 2002; Martin 2007) et le chrome (Coïc, Coppenet 1989) sont essentiels à la croissance des végétaux mais le bore n'est pas nécessaire aux bovins. Cependant, l'iode et le sélénium assimilés par les plantes ne leur sont pas essentiels contrairement aux animaux (Martin 2007). Les rations hivernales composées exclusivement de fourrage et le pâturage en été ne permettent donc pas de couvrir

correctement les besoins en oligo-éléments des animaux. Elles peuvent ainsi entraîner des maladies liées aux carences.

4.2 Les facteurs de variation de la teneur en oligo-éléments dans les plantes

4.2.1 La richesse du sol en minéraux

Le sol est issu de l'altération de la roche-mère sous-jacente. La teneur en oligo-éléments des sols dépend donc essentiellement de cette roche-mère mais également d'un ensemble de modifications susceptibles d'intervenir au cours de la pédogenèse de ce sol (Coïc, Coppenet 1989; Reid, Horvath 1980).

De manière simplifiée, les roches peuvent être réparties en deux catégories : les roches volcaniques et les roches sédimentaires. En général, les roches-mères basaltiques (basiques) sont plutôt riches en oligo-éléments contrairement aux roches éruptives acides (granites), riches en silicates (He et al 2005; Martin 2007). En ce qui concerne les roches sédimentaires, leur teneur en oligo-éléments dépend de leur composition en minéraux primaires (quartz, mica...) et secondaires (argiles et hydroxydes). Ainsi, les grès et les sables, composés de minéraux primaires résistants aux intempéries, sont plus pauvres en oligo-éléments que les schistes et les argiles (Coïc, Coppenet 1989; He et al 2005). Enfin, les dépôts calcaires et les tourbes sont également peu pourvus en éléments traces (Martin 2007) (Cf. Tableau 15).

Tableau 15 : Teneurs en métaux dans les roches mères en mg/kg de roche (Mench 1991; Reid, Horvath 1980)

	Roches volcaniques		Roches sédimentaires		
	Basaltes	Granites	Schistes	Grès	Calcaires
Cu	100	10	45	30	4
Zn	100	40	95	16	20
I	0,5	0,5	5 ?	1,7	5
Se	0,05	0,05	0,6	0,05	0,08
Fe	86 500	14000 - 30000	47200	9800	3800
Mo	1	2	2,6	0,2	0,4

Les phénomènes environnementaux vont également modifier la composition du sol par rapport à la roche-mère (Martin 2007). Les phénomènes d'érosion, dus aux processus de gel/dégel et de lessivages répétés, appauvrissent les sols en oligo-éléments. C'est le cas dans nos régions montagneuses. Lamand et Tressol (1992) ont observé des teneurs en iode très faibles (< 25 µg l/kg) dans les sols des montagnes de l'Est du pays (Vosges, Jura, Alpes) et du Massif Central. La météorologie et la situation géographique influencent également les réserves en oligo-éléments. L'iode est un cas particulier. Cet ion volatil va s'évaporer dans l'atmosphère à partir d'eau de mer, la principale source d'iode pour nos sols. Il va alors être apporté aux terres par le biais des vents et des précipitations par les embruns marins. La

teneur en iode des sols dépend donc de la distance entre les terres et l'océan et de la pluviométrie (Martin 2007). L'extraction des oligo-éléments par les racines des plantes engendre également un appauvrissement des sols (Reid, Horvath 1980).

Enfin, des activités humaines peuvent également intervenir. Les industries chimiques et mines sont des sources d'oligo-éléments pour les champs à proximité (Martin 2007). Aussi, l'apport de fumier, d'engrais concentrés en oligo-éléments et de chaux modifie la composition du sol (Suttle 2010).

Toutefois, la richesse d'un sol en oligo-éléments ne garantit pas leur forte biodisponibilité pour les plantes. Seule une faible quantité d'oligo-éléments du sol est absorbable. La disponibilité pour les plantes est liée, en très grande partie, aux caractéristiques physico-chimiques du sol sur lequel elles poussent (He, Yang, Stoffella 2005; Martin 2007).

4.2.2 Les facteurs influençant la biodisponibilité des oligo-éléments du sol pour les plantes

Les oligo-éléments sont présents dans le sol sous différentes formes plus ou moins assimilables pour les plantes (Cf. Figure 21).

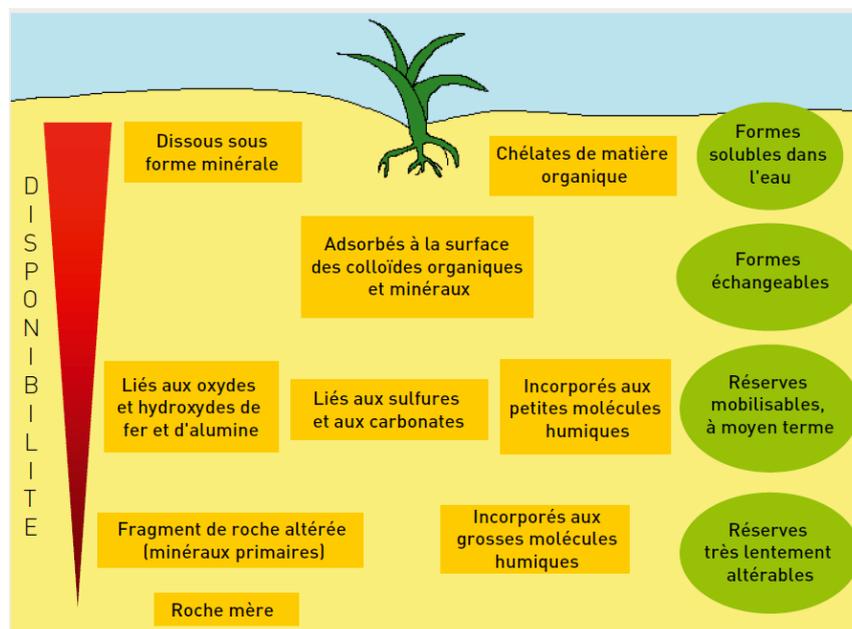


Figure 21 : Les réserves en oligo-éléments du sol (Martin 2007)

Les plantes prélèvent les oligo-éléments présents dans le sol par le biais de leur système racinaire. Les formes assimilables par la plante sont les ions adsorbés sur les complexes argilo-humiques facilement échangeables et les ions solubles dans l'eau (soit libres dans la solution du sol soit chélatés à des molécules organiques) (Martin 2007;

Pasquier 2016). De nombreux facteurs liés aux caractéristiques physico-chimiques du sol font varier la quantité d'oligo-éléments disponibles pour les plantes.

4.2.2.1 L'effet du pH sur l'absorption des plantes

Le pH du sol joue un rôle très important dans l'absorption des oligo-éléments. Il influence la solubilité des micronutriments, leur concentration dans la solution du sol, leurs formes ioniques ainsi que leur mobilité (Fageria, Baligar, Clark 2002). Il va alors faire varier de manière très importante la disponibilité des oligo-éléments (Martin 2007).

Une augmentation de pH dans le sol réduit la solubilité des oligo-éléments. Ainsi, l'absorption racinaire est plus efficace sur des sols acides (Meschy 2017; Pasquier 2016). Par exemple, les cations métalliques Cu^{2+} et Zn^{2+} sont de plus en plus complexés avec l'argile minérale au fur à mesure que le pH augmente (Kao et al. 2020). Le cuivre et le zinc sont donc beaucoup moins disponibles pour les plantes. De plus, l'iode semble beaucoup plus disponible sur sol acide que sur les sols alcalins (Alderman, Jones 1967).

Le molybdène et le sélénium ne suivent pas cette règle générale (Cf. Figure 22). L'absorption du molybdène augmente avec le pH. La concentration en molybdène peut augmenter dans les fourrages cultivés sur des sols calcaires et provoquer des carences secondaires en cuivre chez les bovins. C'est également le cas lors du chaulage des parcelles. L'apport de chaux permet d'améliorer les paramètres acido-basiques du sol mais l'augmentation du pH réduit la quantité de zinc disponible pour les plantes (He, Yang, Stoffella 2005) et concentre le molybdène dans les plantes provoquant des carences en cuivre chez les ruminants (Suttle 2010; Périgaud 1974). Aussi, dans les sols acides, avec un pH inférieur à 6, le molybdène est peu assimilable (Cf. Figure 22) (Coïc, Coppenet 1989).

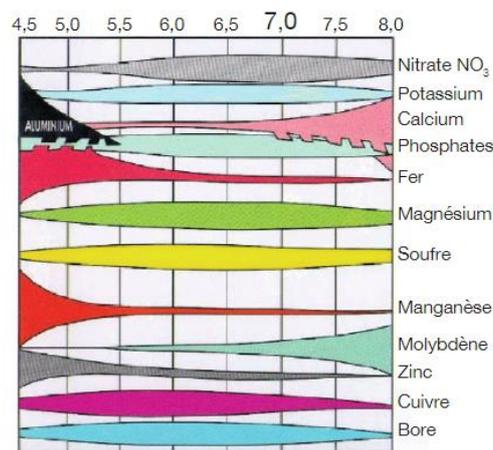


Figure 22 : Schéma d'assimilabilité des éléments nutritifs par les végétaux en fonction du pH du sol (Genot et al. 2009)

Enfin, contrairement à la plupart des oligo-éléments, le sélénium est présent sous forme inorganique dans les sols alcalins, ce qui le rend faiblement assimilable par les plantes. Sur les sols acides, l'iode est également peu assimilable (Kao et al. 2020).

4.2.2.2 *La teneur en matière organique et en argile du sol*

La matière organique du sol joue un rôle important dans la disponibilité des micronutriments pour les plantes (Kao et al. 2020; Thomas et al. 2021). Des éléments du sol tels que l'humus et l'argile vont capter les oligo-éléments. La formation de complexes entre la matière organique et les cations métalliques (chélates) vont améliorer la mobilité et la disponibilité des oligo-éléments pour les plantes (Fageria, Baligar, Clark 2002). Les fortes teneurs en matière organique permettent également d'augmenter les concentrations en oligo-éléments présents dans le sol. Aubert et Pinta (1977) ont observé une accumulation des oligo-éléments dans les couches supérieures du sol à forte teneur en matière organique. En 2021, Thomas et al. ont également constaté des concentrations plus élevées en micronutriments dans les sols riches en matière organique.

Cependant, la complexation des oligo-éléments par les éléments organiques et inorganiques du sol peut également les rendre indisponibles pour les plantes. Dans les sols argileux, le sélénium se lie aux oxydes et aux hydroxydes de fer et d'aluminium et le rend ainsi faiblement assimilable. Les plantes auront plus de sélénium inorganique disponible si elles sont cultivées sur un sol pauvre en argile. Dans les sols, l'iode est également fortement complexé sur les substances organiques et les oxydes de fer et d'aluminium le rendant peu assimilable. Ce phénomène est accentué dans les sols acides (Kao et al. 2020; Jensen et al. 2019). Le cuivre forme des complexes organiques, très stables et généralement insolubles avec les acides organiques des sols tourbeux, entraînant des conditions de carence pour cet élément dans ces sols (Reid, Horvath 1980). Un taux élevé en argile dans les sols favorise également des carences en zinc chez les végétaux. (He, Yang, Stoffella 2005)

Les liaisons des éléments aux colloïdes du sol sont un atout face aux précipitations. Dans les sols sableux, les éléments sont très peu liés au sol. Les phénomènes de lessivage suite à de fortes précipitations vont appauvrir encore le sol (He, Yang, Stoffella 2005). D'après le tableau 16, ce phénomène est vrai notamment pour le cuivre et le zinc. L'idéal, pour optimiser la disponibilité des oligo-éléments est d'avoir un sol équilibré en sable, argile et limon.

Tableau 16 : Teneurs moyennes et assimilables des sols en oligo-éléments (en mg/kg de MS de sol), sols à risque de faible disponibilité et les conditions aggravantes (Martin 2007; Coïc, Coppenet 1989)

	Teneur moyenne des sols	Teneur assimilable	Type de sols à risque de baisse de biodisponibilité	Conditions aggravantes
Cuivre	3 à 100	0,2 à 0,5	Sols sableux lessivés sur granit, grès, sols tourbeux, marais et sols calcaires	Chaulage intensif, richesse en molybdène et en matière organique
Zinc	10 à 300	0,2 à 0,5	Sols sableux acides, lessivés, sols calcaires, surchaulés ou tourbeux	Richesse en phosphore, printemps froid et humide, tassement du sol, chaulage
Iode	2,5 à 12	-	Sols issus de roches ignées acides, sols lessivés	Richesse en argile ou matière organique, chaulage intensif, richesse en molybdène et en matière organique, fertilisation azotée excessive
Sélénium	0,1 à 5	-	Sols lessivés, acides, sols sableux	Richesse en argiles contenant beaucoup d'hydroxydes ferriques, richesse en matière organique

4.2.2.3 L'humidité et l'aération du sol

Les racines des plantes ont besoin d'eau pour assimiler les nutriments présents dans le sol. L'eau permet de dissoudre les oligo-éléments et de les diffuser jusqu'à l'espace libre des racines. Les échanges ioniques passifs seront alors possibles (Martin 2007).

En 2021, Waterman et al. ont mis en évidence que l'incorporation des minéraux dans les végétaux est fortement influencée par les précipitations. Lors des années où la pluviométrie est supérieure à la moyenne, la capacité des plantes à absorber le cuivre est améliorée. Cependant, aucune modification d'assimilation n'a été constatée entre les années sèches et pluvieuses pour le zinc.

Dans le cas du sélénium, les conditions climatiques influencent très peu sa disponibilité. Enfin, l'iode est plus soluble et donc assimilable par les plantes dans les sols gorgés en eau (Kao et al. 2020; Jensen et al. 2019).

4.2.2.4 Les interactions entre les éléments du sol

Comme chez les animaux, ils existent des interactions entre les éléments du sol influençant de manière négative la disponibilité des oligo-éléments par les plantes. La concentration élevée de certains minéraux entraîne des blocages dans le sol pour d'autres éléments. Les plantes sont alors carencées pour l'oligo-élément bloqué. Le tableau 17 nous montre qu'il existe de nombreuses interactions négatives entre les minéraux du sol. Le cuivre et le zinc sont principalement bloqués par le calcium et le fer. Le zinc est également bloqué par le phosphore et le manganèse.

Tableau 17 : Influence de la composition et des caractéristiques physicochimiques des sols sur la disponibilité des oligo-éléments (Martin 2007)

	P	Ca	Fe	Mn	Cu	Zn	Mo
Fe	↓						↓ ¹
Cu		X					
Zn	X	X ²					
Mo	O ³						

	Antagonisme	¹ À pH décroissant
↓	Précipitation	² À pH croissant
X	Blocage	³ En sol acide
O	Inhibition	

BILAN

Nous avons pu voir qu'il existe de nombreux facteurs physico-chimiques du sol influençant la biodisponibilité des oligo-éléments pour les végétaux. Un sol pauvre en un élément, comme les sols provenant des granites de Bretagne occidentale et méridionale pauvre en cuivre (4,8 ppm) (Coïc, Coppenet 1989), peut avoir des conséquences négatives en élevage. Toutefois, un sol riche peut avoir des réserves non-échangeables en très grandes quantités. Ainsi, les concentrations en oligo-éléments des végétaux ne semblent pas être liées aux concentrations totales des sols (Kao et al. 2020). Les analyses de sol ne permettent pas donc de prédire de manière précise la composition minérale d'un fourrage cultivé sur celui-ci.

4.2.3 Les facteurs de variation de la teneur en oligo-éléments dans les fourrages

4.2.3.1 Les familles botaniques

Les prairies naturelles ou permanentes sont par définition des prairies non retournées depuis au moins 5 ans avec une importante diversité botanique dominée par les graminées et les légumineuses.

La composition botanique des prairies influence les teneurs en oligo-éléments des fourrages (Darch et al. 2020; Schlegel, Wyss 2013; Schlegel et al. 2016). En 2020, Darch et al. montrent que les graminées (Dactyle, Vulpin, Fétuque, Houlque laineuse, Ray-grass anglais...) et les plantes telle que l'achillée millefeuille, la chicorée, le plantain ou la Pimprenelle contiennent, en moyenne, moins de cuivre et de zinc que les légumineuses (Lotus, Mélilot, Trèfle des près...). Cependant, les légumineuses sont plus sensibles aux carences en cuivre et sont donc plus sensibles aux carences sur des sols pauvres en cuivre (Martin 2007). Les graminées contiennent significativement plus de zinc que les plantes herbacées mais moins que les légumineuses (Darch et al. 2020). Schlegel et Wyss (2013)

mettent en évidence que la prédominance en Ray-grass dans les prairies fait chuter leur teneur en cuivre. Les prairies riches en Ray-grass avaient 10 % de cuivre en moins que les prairies sans prédominance en Ray-grass (Cf. Figure 24). Ainsi, en 2016, Schlegel et son équipe constatent que les concentrations en zinc et en cuivre diminuent dans des prélèvements d'herbe fraîche de prairies naturelles lorsque le taux de graminées augmente.

Enfin, des différences de teneur en oligo-éléments existent entre espèces et cultivars au sein d'une même famille botanique (Cf. Tableau 18) (Darch et al. 2020; Martin 2007; Schlegel, Wyss 2013).

Tableau 18 : Influence de la famille, de l'espèce et du cultivar sur les teneurs en oligo-éléments des fourrages de prairies naturelles (en mg/kg de MS) et de cultures (Martin 2007; Darch et al. 2020; Coïc, Coppenet 1989)

		Cuivre	Zinc	Sélénium	Iode
(Martin 2007)	Dactyle	8	25	-	-
	Ray Grass d'Italie	8 (Rina) - 7,3 (Tiara)	32	0,05	-
	Bromes	9	25	-	-
	Légumineuses	5 à 9	30 à 35	0,035	-
(Coïc, Coppenet 1989)	Graminées fourragère (pâturage)	5 à 10	30 à 35	-	-
(Darch et al. 2020)	Plantes herbacées	8,10 (cultivée)	23,9 (cultivée)	0,14 (cultivée)	2,03 (cultivée)
		6,68 (sauvage)	16,5 (sauvage)	0,13 (sauvage)	
	Graminées	6,02 (cultivée)	34 (cultivée)	0,10 (cultivée)	0,63 (cultivée)
		5,30 (sauvage)	37,5 (sauvage)	0,12 (sauvage)	
	Légumineuses	12,4 (cultivée)	58,5 (cultivée)	0,12 (cultivée)	0,62 (cultivée)
		10,3 (sauvage)	38,7 (sauvage)	0,10 (sauvage)	

Par ailleurs, les plantes herbacées contiennent significativement plus de sélénium et d'iode que les graminées et les légumineuses (Darch et al. 2020). Quant au sélénium, les plantes accumulatrices (par exemple les Astragales) le concentrent dans leurs organes lorsqu'elles poussent sur des sols sélénifères¹. La ration peut alors être toxique pour les animaux qui la consomment (Martin 2007). Toutefois, le risque de toxicité reste faible voire inexistant car ces espèces ne sont pas utilisées en agriculture (Kao et al. 2020). Enfin, la carence en iode est exacerbée par les plantes dites goitrogènes, contenant des glucosinolates organiques, que sont les plantes de la famille des crucifères (genre *Brassica* avec le colza ou le chou frisé) mais encore le soja brut, la pulpe de betteraves, les graines de lin, le millet et les souches cyanogènes de trèfle blanc (Jensen et al. 2019; Kao et al. 2020; Suttle 2010).

¹ Qui contient du sélénium, qui est riche en sélénium. (CNRTL 2012)

Enfin, la diversité d'espèces botaniques, sur les prairies permanentes, permet alors d'avoir des quantités plus constantes et plus équilibrées en oligo-éléments que dans les cultures mono-spécifiques (Martin 2007).

4.2.3.2 Les organes végétatifs

Il existe des variations de teneur en oligo-éléments suivant les organes végétatifs des plantes. Le cuivre a tendance à s'accumuler dans les racines, qui constituent un lieu de stockage (Coïc, Coppenet 1989; Dejou et al. 1985). La migration vers les feuilles reste liée à celle de l'azote dans les plantes (Dejou et al. 1985). Cela peut expliquer, en partie, que les légumineuses soient plus riches en cuivre que les graminées.

L'iode, en tant qu'élément volatil, est apporté très largement aux plantes par le biais des précipitations. Il va avoir tendance à s'accumuler dans la partie foliaire des végétaux (Martin 2007) et pénétrer dans la plante via les stomates et les cires cuticulaires (Jensen et al. 2019).

L'organe végétatif le plus riche en oligo-éléments reste les feuilles (Martin 2007).

4.2.3.3 Les stades et cycles de végétation

En 1977, Amboulou et Lamand montrent que les teneurs en zinc et en cuivre diminuent avec la maturation des graminées pour atteindre un minimum au stade floraison (Cf. Figure 23).

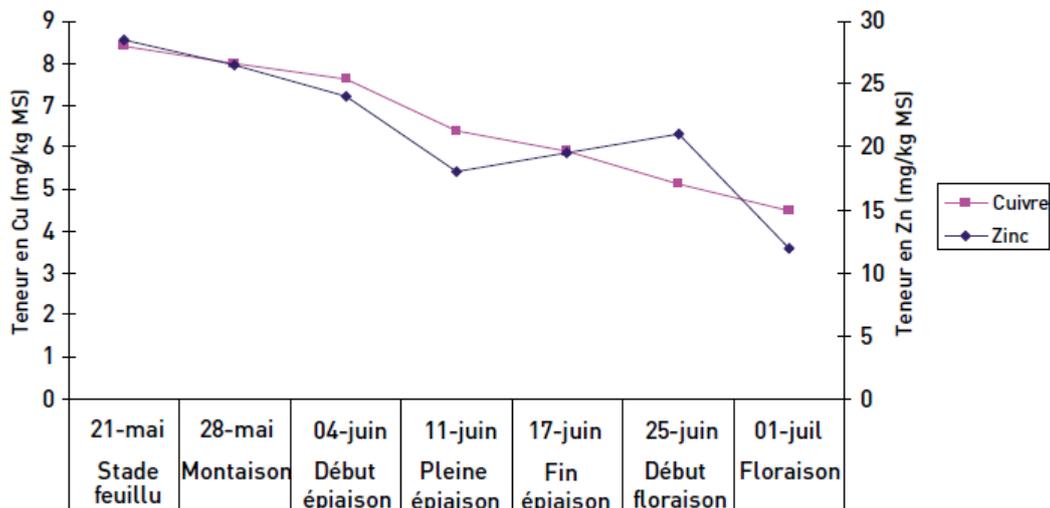


Figure 23 : Evolution de la teneur en cuivre et en zinc du Dactyle en fonction de l'âge de la plante (Martin 2007 d'après Amboulou, Lamand 1977)

En 2013, Schlegel et Wyss constatent les mêmes tendances sur des prés de pâturage en Suisse et remarquent que la diminution de concentration est plus marquée durant les stades précoces (Cf. Figure 24). Ainsi, contrairement aux légumineuses, la teneur en oligo-éléments des graminées dépend beaucoup du stade de végétation.

Au cours de l'année, plusieurs cycles de végétation se succèdent et les teneurs en oligo-éléments augmentent entre le premier et le dernier cycle de l'année. L'effet de dilution est la principale explication de cette augmentation car le couvert végétal des prairies lors du premier cycle est gorgé d'eau. De plus, la pousse rapide de ce premier cycle engendre une absorption moindre des oligo-éléments (Martin 2007). Dans l'étude de Schlegel et Wyss (2013), le premier cycle d'herbe de prairie non conservée avaient 37 % de cuivre et 15 % de zinc ($P < 0,001$) en moins que les repousses des cycles suivants (Cf. Figure 24). La qualité des fourrages en termes de quantité des oligo-éléments s'améliore avec le nombre de cycles pour le cuivre et le zinc (Bellanger, Périgaud, Lamand 1973). La tendance est inversée pour l'iode. En 1982, Hidioglou, Morris, Proulx observent que les teneurs en iode des fourrages d'août sont inférieures à celles de l'herbe de printemps.

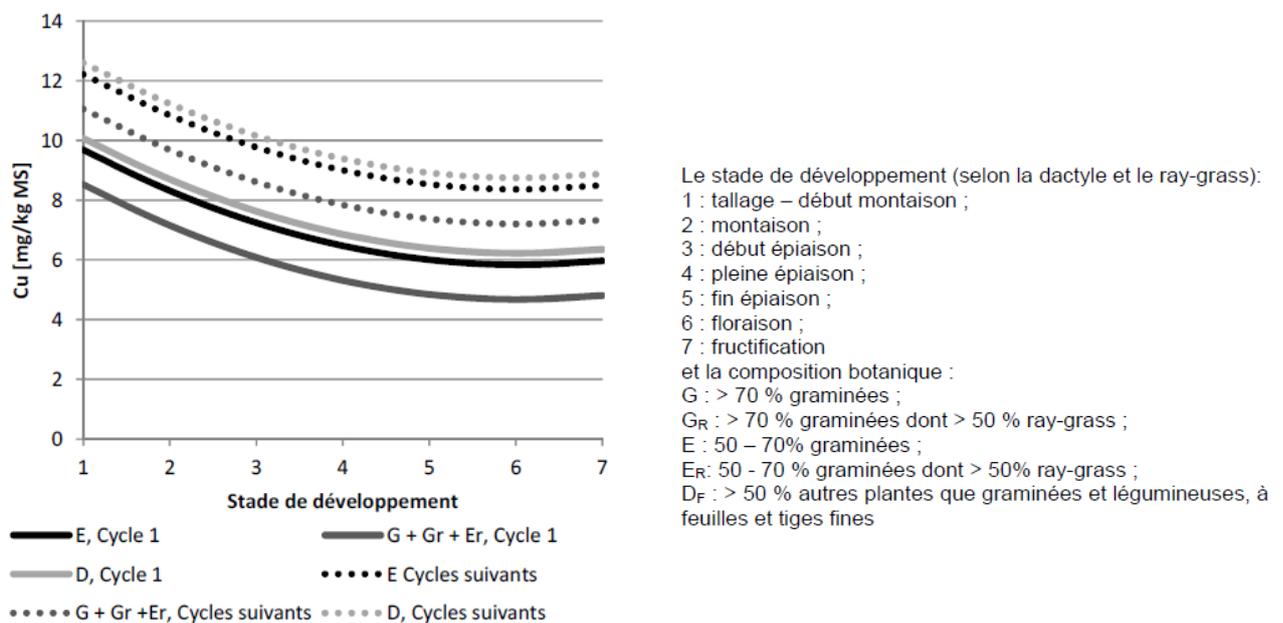


Figure 24 : Modèle proposé de la teneur en cuivre (en mg/kg de MS) de l'herbage non conservé (Schlegel et Wyss 2013)

Ainsi, dans les régions françaises océaniques où les bovins peuvent pâturer toute l'année, il a été constaté une augmentation des teneurs en oligo-éléments entre le premier et le dernier pâturage de l'année (Cf. *Tableau 19*) (Coïc, Coppenet 1989).

Tableau 19 : Teneur en oligo-éléments au cours de la saison de pâturage en régions océaniques françaises (Coïc, Coppenet 1989)

	Premier pâturage de fin d'hiver	Dernier pâturage d'automne
Cuivre	6 ppm	8 ppm
Zinc	25 ppm	30 ppm
Sélénium	0,04 ppm	0,065 ppm

4.2.3.4 *Le stade de récolte et les techniques de transformation et de conservation des fourrages*

Dans certains élevages, les premiers cycles d'herbe sont « déprimés » par un passage précoce des animaux sur les prairies. Bellanger, Périgaud et Lamand (1973) suggèrent à travers leur enquête à partir d'analyses de fourrage français, que cette technique améliore la qualité des fourrages en augmentant leur teneur en cuivre (5,31 ppm contre 5,12 ppm) et surtout en zinc (31,64 ppm contre 27,83 ppm).

Les techniques de séchage font varier les teneurs en oligo-éléments. Lors du séchage de l'herbe, des pertes en oligo-éléments sont observées. La dessiccation des plantes et la manipulation de l'herbe par les machines agricoles brisent les feuilles de l'herbe. Ainsi, les pertes engendrées s'élèvent à 9 % de cuivre ($P < 0,10$) et à 11 % de zinc ($P < 0,05$) pour le foin séché en grange, et même à 18 % de zinc ($P < 0,001$) pour le foin séché au sol (Schlegel, Wyss 2013; Martin 2007). Les fourrages peuvent perdre entre 10 et 25 % d'iode à la suite des travaux de fenaison (Martin 2007). Nous pouvons constater que le temps d'exposition au soleil et de présence au sol (perte de feuilles, variations hydrométriques et temps au sol) influent sur les teneurs en oligo-éléments. De plus, si les fourrages secs sont récoltés lors de mauvaises conditions météorologiques, le lessivage par la pluie peut entraîner une perte d'une partie des oligo-éléments (Demarquilly, Dulphy, Andrieu 1998). Ainsi, les foins récoltés dans de mauvaises conditions (pluviométrie importante) font chuter la digestibilité chez les ruminants en cuivre et en zinc par rapport à la même herbe pâturée (Lamand, Amboulou, Rayssiguier 1977).

Pour ce qui est des ensilages d'herbe, Wyss et al. (2018) ont constaté que les teneurs en minéraux sont légèrement plus élevées que dans les fourrages secs correspondant. Ceci peut s'expliquer par une coupe de l'herbe à des stades de végétation plus précoces pour l'ensilage. Par ailleurs, l'absence de préfanage des ensilages permet d'augmenter significative ($P < 0,05$) les teneurs en zinc (Schlegel, Wyss 2013). Enfin, des mauvaises conditions météorologiques (pluie) lors des travaux de fenaison engendrent des pertes et augmentent la quantité de jus s'écoulant des ensilages représentant également une fuite de minéraux (Martin 2007). Ainsi, la qualité des fourrages va jouer directement sur la disponibilité des oligo-éléments pour les ruminants.

Concernant le stockage, les teneurs minérales n'ont pas évolué durant la conservation du foin et du regain en sec sur un hiver (Schlegel, Wyss 2013). La conservation durant plusieurs hivers, en sec ou en ensilage, peut au contraire augmenter les pertes en oligo-éléments (Martin 2007).

Actuellement, aucune donnée sur la teneur en iode dans les foins conservés n'est disponible (Meschy 2017).

4.2.3.5 La situation géographique

La richesse des fourrages en oligo-éléments peut dépendre de la situation géographique et de l'altitude (Schlegel, Amaudruz, Python 2017) et donc de la nature géologique des sols (Bellanger, Périgaud, Lamand 1973).

L'apport en iode par le vent et la pluie varie en fonction de la distance océan-terre agricole (Jensen et al. 2019). Les pâturages proches du bord de mer seront plus riches en iode que les régions montagneuses des Alpes par exemple. En 1978, Piel observe que les foins les plus pauvres en iode sont récoltés dans le Massif Central et dans les chaînes montagneuses de l'Est (Vosges, Jura, Alpes).

4.2.3.6 Les amendements

Dans une exploitation, les prairies peuvent être fertilisées avec différents amendements : engrais chimiques, engrais enrichis en oligo-éléments, fumier, compost, lisier.... Ces derniers vont apporter de manière complètement différente des oligo-éléments au sol et aux plantes.

Les matières organiques sont plus riches en oligo-éléments que les sols agricoles (He, Yang, Stoffella 2005; Kao et al. 2020) et les fourrages (Herold et al. 2020). Les animaux vont avoir des apports en oligo-éléments en pâturant les prairies et par le biais des complémentations minérales. Le sol sera alors enrichi par les déjections, les fumiers et les lisiers. Nous avons alors un recyclage des oligo-éléments à hauteur de 80 % lors du pâturage (Thomas et al. 2021). Cependant, un apport trop important de fumure peut abaisser les teneurs en cuivre dans les fourrages. Le cuivre se complexe à la matière organique et sera

alors moins disponible pour les plantes (Kerguelen 1962). Sur des sols déjà pauvres en cuivre, la fumure azotée peut diviser la teneur en cuivre par deux (Périgaud 1975). Pour le sélénium et l'iode, très peu d'études se concentrent sur leur apport par le fumier (Kao et al. 2020). En 1967, Alderman et Jones concluent que l'effet de dilution lié au fort rendement suite à des apports en azote réduit la teneur en iode de l'herbe de printemps.

Cependant, les fourrages sont carencés en oligo-éléments. Des techniques de fertilisation des plantes en oligo-éléments se sont développées soit par épandage au sol, soit par pulvérisation foliaire. Les résultats sont satisfaisants pour le sélénium, mais très variables et décevants pour le cuivre et le zinc (Périgaud 1974; 1975; Dejou et al. 1985). En 2017, Wallace et al. montrent qu'il existe une relation linéaire entre la quantité d'engrais au sélénium et la concentration de sélénium dans les fourrages (Cf. Figure 25). Enrichir le sol avec du sélénium augmente alors les concentrations en sélénium dans les plantes. Ranches, Vendramini, Arthington (2017) obtiennent des résultats similaires en pulvérisant du sélénate de sodium dissous dans de l'eau (8,8 g/L) sur des prairies de fauche (7,7 mg Se/kg de MS dans le fourrage fertilisé au sélénium contre 0,1 mg Se/kg MS dans le fourrage témoin). Cependant, les quantités d'engrais séléniés doivent être extrêmement bien maîtrisées pour limiter le risque de toxicité.

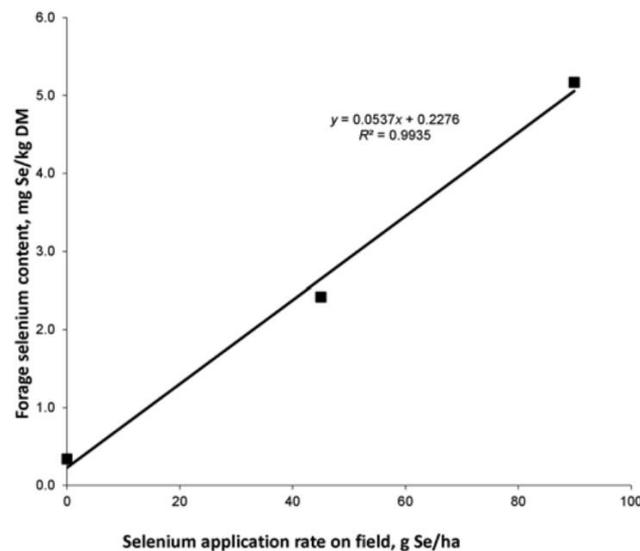


Figure 25 : Relation entre la quantité de sélénium appliquée par fertilisation (g Se/ha avec du sélénate de sodium) et la teneur en sélénium fourragère observée (g Se/kg de MS). (Wallace et al. 2017)

BILAN

La figure 26 résume les principaux facteurs de variation des teneurs en oligo-éléments dans le sol, les plantes et les animaux. Les oligo-éléments du sol vont être, en partie, absorbés par les plantes. Selon les facteurs environnementaux et les techniques de récolte, les plantes vont avoir des teneurs plus ou moins importantes en oligo-éléments. De manière générale, les fourrages en France ne permettent pas de couvrir les besoins en oligo-éléments (Cf. *Tableau 20*). Or, les oligo-éléments sont essentiels pour le développement des jeunes veaux. Une complémentation en minéraux est donc nécessaire pour pallier les carences et optimiser les performances en termes de santé, de production, de reproduction et de croissance.

Tableau 20 : Apports journaliers recommandés, seuils de carence pour les bovins adultes et gamme de concentration dans les fourrages pour le cuivre, le zinc, l'iode et le sélénium (en mg/kg de MS) (INRA 1988; Bellanger 1971; Enjalbert 2009b)

	Cuivre	Zinc	Iode	Sélénium
Apports journaliers recommandés	10	50	0,5	0,1
Seuil de carence pour les bovins	7	45	0,15	0,1
Gamme de concentrations dans les fourrages en France	4 à 10	20 à 80	0,03 à 0,2	0,1 à 0,3

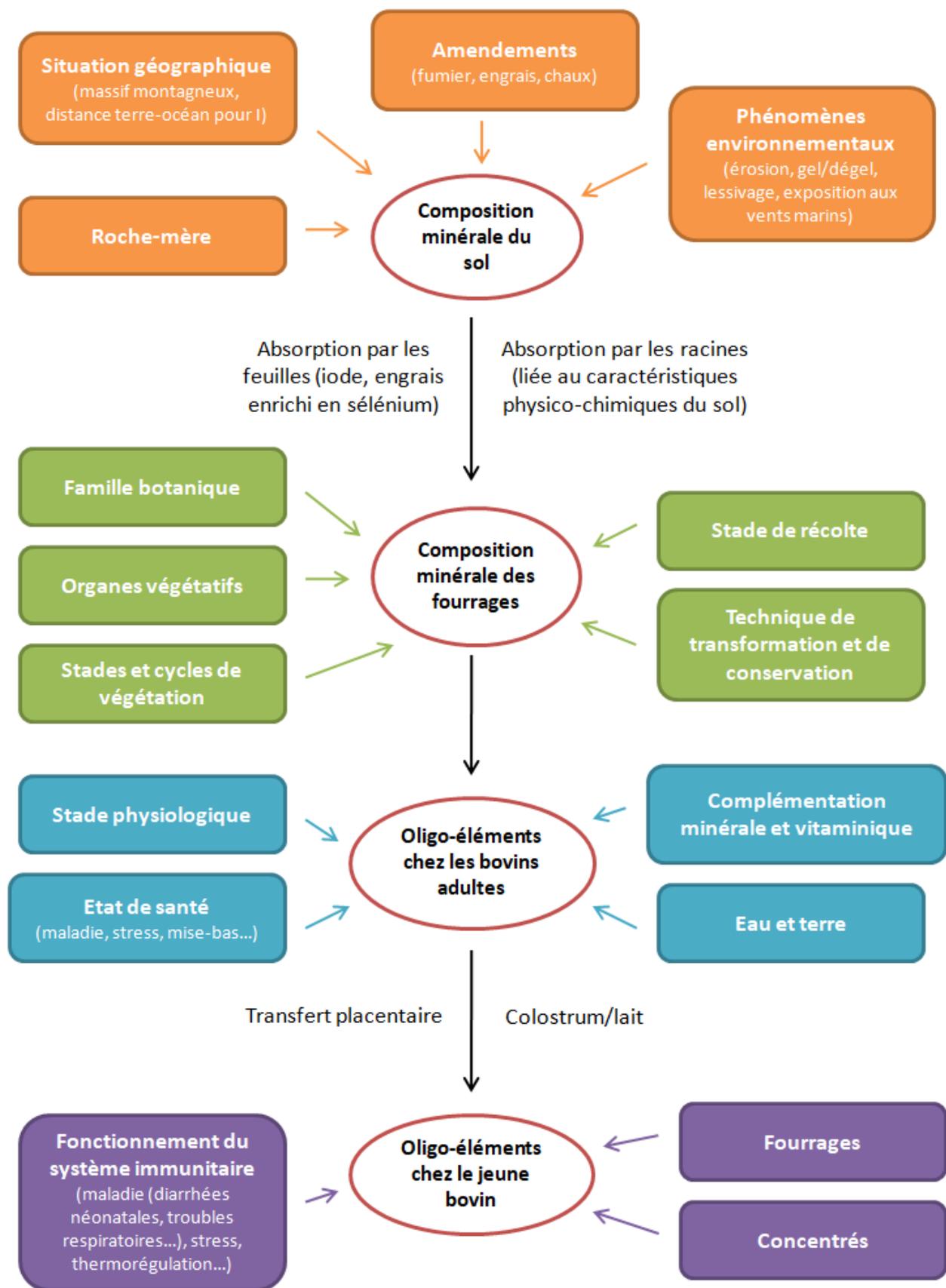


Figure 26 : Facteurs de variation de la teneur en oligo-éléments dans le continuum sol-plante-bovin

4.3 La complémentation en oligo-éléments, essentielle pour la santé des bovins

Les fourrages sont relativement pauvres en oligo-éléments et ne permettent pas de couvrir les besoins des bovins. Une complémentation minérale est essentielle pour la santé et pour garantir une production optimale des troupeaux allaitants en système herbager.

4.3.1 La réglementation européenne

La législation classe les oligo-éléments dans la catégorie « additifs nutritionnels » pour les animaux. Le règlement européen (CE) n°1831/2003 encadre les conditions d'autorisation, d'utilisation et de mise sur le marché des additifs actuellement autorisés pour l'alimentation animale. L'annexe 3 reprend la liste positive européenne mise à jour pour les oligo-éléments.

Étant donné que les oligo-éléments présentent une certaine toxicité pour les ruminants, des teneurs maximales autorisées dans les aliments sont définies précisément (Cf. *Tableau 21*). Depuis 2003, des réévaluations sont faites régulièrement. C'est notamment le cas pour l'iode. Il existe une corrélation linéaire entre la concentration en iode alimentaire et la concentration en iode dans le lait (Flachowsky et al. 2014). Cette dernière peut, par exemple, augmenter par le trempage des trayons avec un produit désinfectant iodé ou diminuer par la présence de goitrogènes dans la ration (Castro et al. 2011; Flachowsky et al. 2014). Sa teneur maximale autorisée est donc actuellement de 5 mg/kg d'aliment complet pour les vaches laitières afin de répondre aux besoins des animaux mais également de garantir une concentration en iode dans les produits laitiers conforme pour la santé humaine. Les valeurs autorisées ont également été redéfinies pour l'alimentation porcine dans un objectif de réduire les rejets de cuivre potentiellement toxique pour l'environnement (Jondreville et al. 2002).

La priorité est donc de garantir des apports suffisants en oligo-éléments pour couvrir les besoins des animaux tout en respectant l'environnement et la santé humaine.

Tableau 21 : Teneur maximale réglementaire en oligo-éléments dans les aliments pour les ruminants (concentrés, aliment minéral vitaminé, bolus, pierre à lécher, solution buvable...) (en mg de substance active/kg d'aliment complet ayant une teneur en humidité de 12 %) (Règlement (CE) n° 1831/2003 ; Règlement (CE) n°1459/2005)

Substance active	Teneur maximale
Cuivre	Bovins avant le début de la rumination : 15 Autres bovins : 30
Zinc	120
Iode	Ruminants laitiers : 5 Autres bovins : 10
Sélénium	0,50

4.3.2 Les sources spécifiques autorisées

Pour compléter les animaux en oligo-éléments, deux formes sont disponibles : les sources minérales et les sources organiques (Cf. *Tableau 22 et Annexe 3*).

Tableau 22 : Sources minérales et organiques des oligo-éléments (Meschy 2017; Harvey, Cooke, Marques 2021 ; Règlement (CE) n° 1831/2003)

Sources minérales					
	Acétate	Carbonate	Chlorure	Sulfate	Oxyde
Cuivre	x	x	x	x	x
Zinc	x		x	x	x
Iode	Iodure (KI et NaI) - Iodate de calcium ($\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$ et $\text{Ca}(\text{IO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$)				
Sélénium	Sélénite de sodium (Na_2SeO_3) – Sélérate de sodium (Na_2SeO_4)				
Sources organiques					
Cuivre, Zinc et Sélénium	Formes chélatées : complexe avec des acides aminés ou des protéines (Sélenométhionine contenue dans des levures, chélate de zinc et de glycine hydratée, chélate de cuivre (II) et d'hydrolysats de protéine)				
	Intérêts : augmenter l'absorption intestinale tout en diminuant les interactions avec d'autres oligo-éléments (neutralité électrochimique) (Meschy 2017; Harvey, Cooke, Marques 2021)				

Pour un même oligo-élément, les sources minérales n'ont pas les mêmes niveaux de biodisponibilité (Meschy 2017) :

- **Cuivre** : le chlorure est quasi 20 fois plus disponible que le sulfate (NRC 2001). Le carbonate et le sulfate sont équivalents mais l'oxyde a une biodisponibilité inférieure. L'oxyde (CuO) est utilisé dans les systèmes à libération prolongée (par exemple les bolus) (Rollin 2002). Cependant, Stewart (2017) déconseille de l'utiliser pour sa mauvaise absorption chez les ruminants.
- **Zinc** : le sulfate et l'oxyde ont des valeurs nutritionnelles équivalentes. Selon les études, le carbonate a une biodisponibilité inférieure ou égale à celle du sulfate.
- **Iode** : les formes minérales sont équivalentes. L'iodate est plus stable par rapport aux iodures et sera donc plus utilisé pour la fabrication des blocs à lécher.
- **Sélénium** : le sélénite et le sélérate sont équivalents sur le plan nutritionnel (Podoll et al. 1992).

Pour le cuivre, les études obtiennent des résultats contradictoires. Certaines montrent des capacités d'absorption supérieures pour les formes organiques, notamment en présence de forte concentration en molybdène, d'autres concluent sur des disponibilités équivalentes entre les sources organiques et inorganiques (NRC 2001).

Dans plusieurs études, il n'y pas de différences significatives d'absorption intestinale entre les formes minérales de sélénium et la sélénométhionine (Spears 2003). Cependant, la levure enrichie en sélénium est connue pour ses capacités à concentrer de manière plus importante le sélénium dans les tissus (muscles) (Spears 2003) ainsi que dans le lait et le sang (Ortman, Pehrson 1997; Knowles et al. 1999; Ceballos et al. 2009) que les sources inorganiques. Cette différence de concentration peut être expliquée par une incorporation de la sélénométhionine dans les protéines des tissus à la place de la méthionine (Spears 2003). De manière générale, on observe les mêmes résultats pour le zinc. L'absorption des sources organiques en zinc est quasi équivalente à celle des sources minérales et le zinc se concentre plus dans les tissus lorsque des formes organiques sont distribuées.

De nombreuses études ont montré les effets bénéfiques d'une supplémentation en oligo-éléments organiques sur les performances en termes de production (quantité et qualité du lait) et de reproduction (fertilité et fécondité) chez les vaches laitières comme chez les vaches allaitantes. Cette supplémentation permet également d'améliorer le statut immunitaire des adultes en péripartum et de leur descendance (amélioration de la capacité anti-oxydante du sérum des veaux, augmentation de la concentration des immunoglobulines...) réduisant le taux de mortalité des nouveau-nés (Harvey, Cooke, Marques 2021).

En 2016, Marques et al. ont travaillé sur un lot de 84 vaches multipares, non allaitantes, gestantes, de race Angus x Hereford afin de comparer les effets des sources organiques et inorganiques en oligo-éléments sur la production et la physiologie des nouveau-nés. Ils ont observé que les veaux, issus de vaches ayant reçu une complémentation organique, avaient des concentrations hépatiques en cuivre et en zinc plus élevées ($P \leq 0,05$). Ils présentés des poids corporels plus importants au sevrage ($P \leq 0,05$), une croissance homogène jusqu'à l'abattage et une incidence réduite des maladies respiratoires ($P < 0,01$) par rapport au lot sans complémentation. Ils concluent alors que la complémentation en oligo-éléments organiques (cobalt, cuivre, zinc et manganèse) durant le dernier trimestre de gestation semble optimiser la santé et la croissance de la descendance dans les filières bouchères.

Cependant, la réponse aux minéraux organiques est variable selon les conditions expérimentales et/ou d'élevage et du statut physiologique.

En pratique, le coût élevé des sources organiques par rapport à celui des sources inorganiques est un réel frein dans leur utilisation actuelle (Meschy 2017).

4.3.3 Les différentes formes de distribution disponible

D'après Pin (2007), le bolus à action différée est la forme la plus adaptée, pour apporter en continu des oligo-éléments aux ruminants. Il existe plusieurs formes de complémentation disponibles pour les éleveurs (Cf. Tableau 23). À eux de choisir en fonction de leur système d'élevage, des avantages et des limites de chaque forme.

Tableau 23 : Les formes de complémentation des oligo-éléments aux bovins (Pin 2007)

	Formes	Avantages	Limites
Distribution dans les aliments	CMV (=AMV)	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de distribution (si remorque mélangeuse) • Apport régulier • Sécurité des apports individuels 	<ul style="list-style-type: none"> • Selon la biodisponibilité des sels minéraux
	Semoulette Granulés	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de distribution (si remorque mélangeuse) • Apport régulier • Grand intérêt en doses flash 	<ul style="list-style-type: none"> • Main d'œuvre si distribution sur le long terme • Sécurité des apports individuels
Distribution dans l'eau	Solution	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de distribution • Apports programmables 	<ul style="list-style-type: none"> • Main d'œuvre • Équipement
Distribution particulière (ad libitum)	Pierre à lécher Seau à lécher	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de distribution 	<ul style="list-style-type: none"> • Appétence trop grande • Phénomène de dominance des vaches • Pas de sécurité de la dose • Dégradation de la pierre en fonction des conditions extérieures (pluie) • Distribution peu régulière • Coût élevé pour des apports sur plusieurs mois
Distribution particulière (administration individuelle)	Voie injectable	<ul style="list-style-type: none"> • Sécurité de la dose 	<ul style="list-style-type: none"> • Durée d'action limitée • Contention des animaux
	Voie orale : bolus à action retard	<ul style="list-style-type: none"> • Économie de main d'œuvre • Effet sur le long terme • Sécurité des apports • Biodisponibilité liée à la dégradabilité permanente • Une manipulation pour de nombreux mois 	<ul style="list-style-type: none"> • Correction plus longue si statut effondré (à associer à un apport flash) • Contention des animaux

4.3.4 La complémentation minérale au pâturage

L'objectif de la complémentation en oligo-éléments au pâturage est de pallier les carences du couvert végétal (Cf. *Tableau 21*). De nombreux facteurs de variation vont influencer la teneur en oligo-éléments dans les plantes (Cf. *Figure 26*). Les prairies naturelles sont généralement pauvres en cuivre, en zinc, en sélénium et déficitaires en iode (Gaillard 2019). Pour estimer l'apport des oligo-éléments par la prairie, des analyses d'herbe peuvent être effectuées. En pratique, ces analyses sont surtout utilisées pour connaître la composition en minéraux (Ca, P, K et Mg) et en vitamines. Les vétérinaires et les éleveurs peuvent alors se réaliser des profils métaboliques ou utiliser les tables de valeurs alimentaires proposées par l'INRAe, par exemple. Vétalis propose également une géolocalisation des carences en oligo-éléments (*L'observatoire des oligo-éléments dans les terres agricoles* 2019). Au-delà de la teneur en oligo-éléments, la quantité d'herbe ingérée par les animaux rentre en compte. Le niveau d'ingestion d'herbe varie en fonction de l'appétence, de la qualité, de la disponibilité de l'herbe, de la structure du couvert végétal, du chargement de la prairie et du temps de pâturage et de la vitesse d'ingestion de l'herbe (maximum 2,5 à 3 kg de MS par heure) (Rousseau 2009).

Une fois que les carences en oligo-éléments sont estimées pour le troupeau, l'éleveur va supplémenter ces animaux. Il est essentiel de complémentation les vaches en fin de gestation. L'apport d'oligo-éléments au pâturage est un réel challenge pour l'éleveur. Il existe de nombreuses formes de distribution des compléments avec leurs avantages et leurs inconvénients (Cf. *Tableau 23*). Cette distribution en complément minéral est encadrée par la réglementation européenne (*Règlement (CE) n° 1831/2003*) qui définit les doses maximales quotidiennes autorisées pour les oligo-éléments, ce qui interdit les cures pour les oligo-éléments stockables (Rousseau 2009; Gaillard 2019). Il existe deux grands « types » d'apport : le droguage forcé (bolus) ou le libre-service. Pour les blocs et les seaux à lécher, la consommation volontaire est comprise entre 80 et 120 g par jour pour une vache (Meschy 2007). Elle peut être inférieure ou supérieure selon la hiérarchie dans le troupeau. Cette consommation quotidienne doit pallier les carences. Pour cela, les seaux à lécher doivent contenir des concentrations minimales pour couvrir les besoins de tous les individus du troupeau (Cf. *Tableau 24*). Il faut alors compter environ un seau ou bloc de 10 kg pour cinq animaux. Ils doivent être disposés loin des points d'eau pour éviter la surconsommation. Les blocs peuvent être posés sur des supports pour éviter le contact avec l'humidité du sol (Rousseau 2009).

Tableau 24 : Concentration minimale d'oligo-éléments nécessaire pour un AMV pâturage en seau consommé à hauteur de 100 g/j/bovin (en mg/kg) (Rousseau 2009)

Type de bovin	Cuivre	Zinc	Iode	Sélénium
Vache en lactation ingestion 20 kg MS	800	2000	40	6
Vache allaitante début lactation ingestion 15 kg MS	600	1500	30	4,5

La distribution sous forme de granulés nécessite des dispositifs permettant de protéger l'AMV des aléas climatiques (faible appétence des minéraux, installation, humidité). Contenu du prix de l'installation, cette forme est donc peu utilisée. Enfin, il existe les bolus intra-ruminaux. Ils permettent une diffusion régulière et continue des oligo-éléments. Différentes compositions et durées de diffusion existent (Gaillard 2019). Malgré la main d'œuvre et les moyens de contentions nécessaires pour les administrer, ils permettent d'avoir un certain niveau de sécurité d'apports. Les bolus sont alors très intéressants pour les vaches en fin de gestation.

BILAN

Le cuivre, le zinc et le sélénium sont indispensables pour le système immunitaire. Ce sont des composants du système antioxydant protégeant les cellules de l'organisme et contribuant à l'activité des cellules immunitaires. L'iode va également être un facteur important pour la santé du veau en intervenant notamment dans la thermorégulation, le système immunitaire, et la régulation du surfactant pulmonaire.

Les oligo-éléments sont transmis de la mère au veau par voie placentaire et par le colostrum/lait. Pour permettre la constitution des réserves chez le veau avant sa naissance et la synthèse d'un colostrum de qualité, les besoins en oligo-éléments chez la mère augmentent en fin de gestation et en début de lactation. L'apport en oligo-éléments en péripartum va également permettre aux vaches de renforcer leur système immunitaire mis à rude épreuve autour du vêlage.

Cependant, les fourrages d'herbe déficitaires en cuivre, en zinc, en sélénium et en iode ne permettent pas de couvrir les besoins chez les bovins adultes. Ces carences vont engendrer des baisses de performance en termes de production, de reproduction et de santé. Les bovins carencés sont alors sujets aux maladies. L'évaluation du statut en oligo-éléments chez les animaux en parallèle d'un dosage dans les fourrages permettent d'adapter de manière optimale la complémentation en minéraux. Cette dernière est parfois compliquée à mettre en place au pâturage.

L'objectif de notre étude expérimentale est d'analyser l'évolution de la cuprémie, de la zincémie, de l'iodémie et de la sélénémie autour de la mise-bas chez des vaches allaitantes de race Salers et Aubrac, dans une exploitation de moyenne montagne, valorisant leur système herbager toute l'année. Des analyses de fourrage vont venir compléter l'évaluation du statut en oligo-éléments des animaux. Nous allons essayer de voir si la santé des adultes et des nouveau-nés est impactée par le statut en oligo-éléments et si la complémentation en minéraux est adaptée aux besoins en oligo-éléments de ces vaches.

**PARTIE 2 : ETUDE EXPERIMENTALE –
EVALUATION DU STATUT EN OLIGO-ELEMENTS
CHEZ DES BOVINS ALLAITANTS EN SYSTEME
HERBAGER**

1 Contexte et objectifs de l'étude expérimentale

Les États généraux de l'alimentation, qui se sont déroulés en juillet 2017, ont conclu qu'il fallait repenser nos pratiques d'élevage et transformer nos modèles de production afin de proposer aux consommateurs une alimentation saine, répondant à leurs attentes (environnement, bien-être animal) et qui fasse vivre les agriculteurs. Cette conclusion reprend clairement le cadre de la politique agricole définie par le gouvernement, depuis 2014 et la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt, qui pose les finalités suivantes : « assurer à la population l'accès à une alimentation sûre, saine, diversifiée, de bonne qualité et en quantité suffisante, produite dans des conditions économiquement et socialement acceptables par tous, favorisant l'emploi, la protection de l'environnement et des paysages et contribuant à l'atténuation et à l'adaptation aux effets du changement climatique. » (Code rural et de la pêche maritime 2021). Dans ce même article, « L'Etat encourage le recours par les agriculteurs à des pratiques et à des systèmes de cultures innovants dans une démarche agroécologique ».

L'agroécologie utilise les connaissances de l'écologie et de l'agronomie pour concevoir des systèmes de production durables, moins productivistes mais plus autonomes, et privilégiant une production de qualité (Ministère de l'agriculture et de la Souveraineté alimentaire 2013). Un élevage agroécologique propose effectivement un modèle de production socialement acceptable et répondant au principe du « one-health ». La démarche agroécologique repose sur 5 principes de l'agroécologie en élevage (Cf. Figure 27), dont chacun peut être relevé par l'utilisation des prairies pour l'alimentation des ruminants.

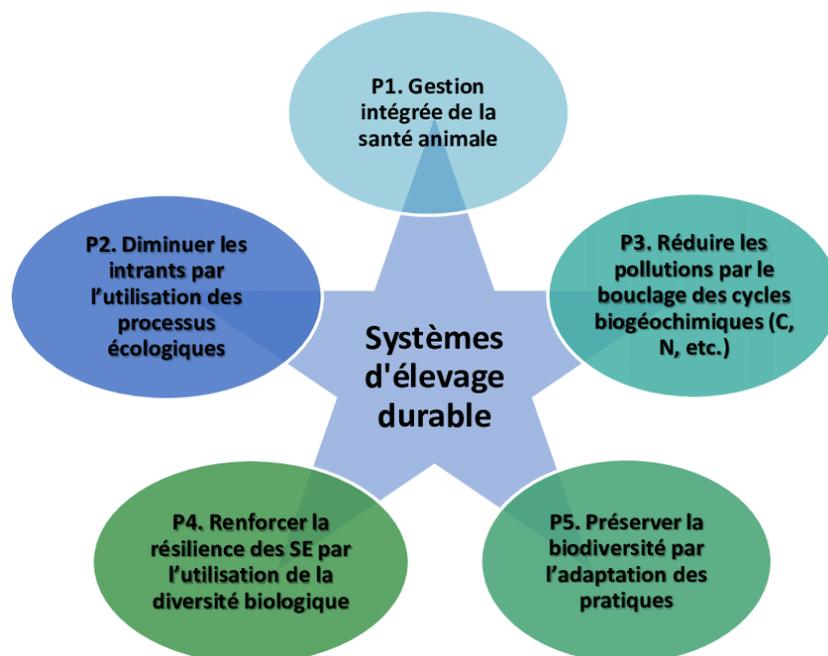


Figure 27 : Les 5 principes agroécologiques en élevage selon (Dumont et al. 2013)

Néanmoins, les nouvelles pratiques agroécologiques vont modifier assez sensiblement les conduites d'élevage : diversité des rations (plus de diversités prairiales), gestion des prairies plus respectueuses de l'environnement et conduire à une utilisation plus raisonnée des intrants médicamenteux ou phytosanitaires, conditions qui peuvent potentiellement modifier la santé et le bien-être des animaux. En particulier les carences en oligo-éléments sont favorisées sur des animaux exclusivement menés en système herbager car les prairies et les fourrages sont pauvres en oligoéléments et qu'il est difficile de maîtriser la complémentation. Ces dernières sont à l'origine, le plus souvent, de pertes économiques liées à des maladies chez les nouveau-nés essentiellement et des baisses de performance de reproduction chez les adultes. Pour ce travail, nous nous intéresserons à l'évolution de la cuprémie, de la zincémie, de l'iodémie et de la sélénémie dans un troupeau allaitant de race Salers et Aubrac, dans une exploitation de moyenne montagne valorisant leur système herbager toute l'année. L'étude expérimentale de ce travail s'est déroulée de décembre 2021 à juin 2022.

2 Matériel et méthode

2.1 Présentation de l'exploitation agricole

Nous avons travaillé avec un élevage bovin mixte laitier-allaitant situé à 1100 mètres d'altitude à Aubignat commune de Mazoires (63). Le GAEC des Baraques possède 100 vaches allaitantes de race Salers et Aubrac et 90 vaches laitières de race Montbéliard. Le lait des vaches laitières est vendu en laiterie pour la fabrication du Saint Nectaire. Les vaches allaitantes élèvent leurs veaux destinés à la vente de broutards. Elles sont conduites en stabulation aire paillée de décembre à mai et au pâturage sur des prairies naturelles de fin mai à novembre. Tous les fourrages d'herbe sont produits sur l'exploitation. La totalité du parcellaire, valorisée pour l'atelier allaitant, est en prairie permanente. Il est utilisé pour le pâturage et pour les fourrages secs. Le troupeau est conduit en monte naturelle avec des taureaux de race Charolais et Aubrac. Les vaches Salers sont croisées avec les taureaux Charolais alors que le troupeau Aubrac est mené en race pure. Les vêlages se répartissent d'octobre à mai.

Ce troupeau présente un intervalle vêlage-vêlage (IVV) de 371 jours correspondant à 0,98 veau/vache/an. En race Salers, un IVV de 377 jours avec un 1 veau/vache/an est attendu (Groupe Salers Evolution 2000). Les critères pour la race Aubrac sont un IVV proche de 365 jours avec un 1 veau/vache/an (O.S. Race Aubrac 2022). Notre élevage est donc dans les normes « théoriques » des races en termes de performance de reproduction des adultes. En comparaison avec les autres élevages de même race, les vaches se placent dans la moyenne haute (IVV moyen Salers : 403 jours et IVV moyen Aubrac : 392 jours (Saby et al. 2022a,b)).

Sur le plan sanitaire, le troupeau allaitant rencontre des maladies se concentrant sur les deux derniers mois de stabulation (avril et mai). Il s'agit essentiellement de diarrhées néonatales et de troubles respiratoires sur les veaux de moins de 10 jours. Les veaux présentent très peu d'omphalites. Le taux de morbidité² chez les veaux de l'atelier allaitant est de 70 %. Les veaux sont, de manière générale, plus malades durant la période en stabulation. Cependant, durant cette période, l'éleveur surveille 2 fois par jour ses animaux. Il peut alors détecter très rapidement les signes cliniques de ses veaux malades et mettre en place un traitement de manière précoce. Tous les veaux malades (troubles respiratoires ou diarrhées néonatales) reçoivent un traitement à base d'antibiotique (troubles respiratoires : florfénicol, 2 ml pour 15 kg, Resflor® ; diarrhées : ampicilline et colistine, 1 ml pour 10 kg, Multibio®) par voie intramusculaire, néanmoins, le protocole pour les diarrhées néonatales comprend aussi des antibiotiques (amoxicilline, acide clavulanique, 1 comprimé pour 40 kg, Synulox®) par voie orale. Ainsi, le taux de létalité³ de l'atelier allaitant est faible (5,4 %). La mise en place d'une antibiothérapie chez les veaux malades permet d'obtenir un taux de létalité faible. Cependant, le taux de mortalité⁴ des veaux est de 9,5 % (vêlage dystocique et accident sont les principales causes de mortalité) ce qui est relativement élevé par rapport à la moyenne régionale des deux races (Vidal et al. 2018). Or, face au durcissement de la réglementation sur les antibiotiques et le coût important en frais vétérinaires, une stratégie pour réduire l'incidence des maladies doit être réfléchie. De plus, l'utilisation des antibiotiques par voie orale augmente les risques de résistance des pathogènes et de mauvais développement du microbiote digestif. Dans ces élevages valorisant leur système herbager où la mise en place de complémentation minérale n'est pas évidente, les animaux sont très souvent carencés en oligo-éléments (Cf. *Tableau 25*). Or, les oligo-éléments sont essentiels pour la santé des animaux. L'apport adéquat d'oligo-éléments dans cet élevage pourrait donc être un des leviers d'action pour réduire les maladies chez les veaux.

2.2 Les animaux

2.2.1 Sélection des animaux

En novembre 2021, nous avons choisi 8 vaches allaitantes multipares et gestantes, 4 de race Aubrac et 4 de race Salers. Les primipares ont été écartées de l'expérience, car elles ont encore des besoins de croissance. Les vaches ont été sélectionnées en fonction de leur date prévue de mise-bas, c'est-à-dire fin mars-début avril 2022. La note d'état corporel n'a pas été un critère d'inclusion, mais elles devaient être dans un état correct à leur entrée en stabulation.

² Morbidité : nombre de veaux malades

³ Létalité : nombre de veaux malades morts

⁴ Mortalité : nombre de veaux morts

2.2.2 Introduction des animaux dans le protocole

Sur les 8 vaches du protocole, des prélèvements sanguins ont été réalisés en janvier 2022 pour doser le cuivre et le zinc plasmatique. Nous leur avons également attribué une note d'état corporel (objectif pour un vêlage fin de printemps : 1,5 à 2/5 avec la grille française) et une note de remplissage du rumen (note moyenne : 3/5) (Cf. Annexes 4 et 5). Ces premiers résultats constituent le T0 de l'étude expérimentale (Cf. Tableau 25). Les concentrations en cuivre et en zinc plasmatique sont plus faibles que les valeurs usuelles. Les vaches retenues pour notre essai sont donc carencées en cuivre et en zinc. La note d'état corporel (NEC) et la note de remplissage du rumen (NRR) sont correctes chez les deux races. Ce bilan initial permet de conclure que les animaux choisis conviennent pour notre étude.

Tableau 25 : Bilan initial (T0) des vaches retenues pour notre essai pour la cuprémie, la zincémie, la note d'état corporel (NEC) et la note de remplissage du rumen (NRR) (moyenne +/- écart-type)

	Cuivre ($\mu\text{mol/L}$)	Zinc ($\mu\text{mol/L}$)	NEC		NRR
			Aubrac	Salers	
Valeurs expérimentales	9,04 +/- 0,83	4,00 +/- 1,10	3,00 +/- 0	2,25 +/- 0,29	3,50 +/- 0,54
Valeurs de référence / Objectifs	11 - 18	> 14	2,5 (avant l'entrée en stabulation)		3
Conclusion	Faible (subcarence)	Faible (déficient)	Etat correct	Etat correct	Bonne note

2.2.3 Alimentation et complémentation des animaux

Afin de valoriser leur système herbager, les éleveurs nourrissent leurs animaux avec les fourrages produits sur l'exploitation. Les éleveurs utilisent de l'herbe et du foin récolté au stade floraison. Les vaches ne reçoivent pas de concentrés du commerce ni de céréales. Un seau à lécher permet de compléter les rations en minéraux et vitamines. Ces matières premières sont décrites dans l'annexe 6, et 7 pour le seau. Les rations distribuées aux animaux figurent dans le tableau 26 ci-dessous. Au vu de la composition en oligo-éléments des seaux, les vaches ne reçoivent pas de supplémentation en cuivre. Leur seule source de cuivre est le foin et l'herbe des pâtures.

En stabulation (période hivernale), les vaches reçoivent du foin d'herbe à volonté. Elles consomment environ 12 kg de foin par jour en fin de gestation et 14 kg de foin par jour en début de lactation. Elles ont à leur disposition des blocs de sel ainsi que des seaux à lécher (Cf. Annexe 7). En stabulation, les seaux sont très peu consommés par les vaches (1 seau de 20 kg/14 VH/4 mois, soit environ 12 g/VH/j). Les éleveurs ne mettent pas en place de bolus intra-ruminaux. La ration distribuée en stabulation reste inchangée sur toute la période. Elle couvre la fin de gestation et le début de lactation des vaches. Pour ces deux stades physiologiques, la ration en stabulation ne permet pas de couvrir les besoins en

énergie, en protéines et en minéraux majeurs (Cf. *Tableau 26*). La note d'état corporel est un outil permettant d'appréhender la couverture énergétique du troupeau. En stabulation, les animaux perdent jusqu'à 1 point de NEC. De plus, les NEC sont très hétérogènes notamment dans le troupeau Salers (Cf. *Tableau 25*). Tout ceux-ci nous montrent bien que la ration est déficitaire en énergie.

Au printemps, les vaches allaitantes pâturent sur des prairies permanentes. Elles consomment en moyenne 15 kg de matière sèche par jour (Delagarde et al. 2001). Elles ont également des blocs de sel et des seaux à lécher à leur disposition (1 kg de minéral/VH/mois, soit 33 g/VH/j). Avant la rentrée en stabulation pour la période hivernale, les éleveurs distribuent du foin d'herbe pour compléter les faibles apports en herbe. Les vaches consomment jusqu'à 10 kg de foin par jour. En décembre, la ration avant l'entrée en stabulation est déficitaire en énergie (Cf. *Tableau 26*). 3 semaines après l'entrée en stabulation, la NEC des vaches Salers est plutôt faible alors que celle des vaches Aubrac est correcte (Cf. *Tableau 25*). La ration permet de couvrir, malgré le déficit, les besoins en énergie des vaches Aubrac mais pas ceux des vaches Salers. Cette ration manque également d'azote dégradable (Cf. *Tableau 26*). Elle permet cependant de couvrir les besoins en calcium, phosphore et magnésium. Au mois de mai, la ration à l'herbe en début de lactation permet de couvrir les besoins en énergie, en protéines et en minéraux. Les animaux peuvent refaire des réserves. La couverture énergétique permet alors d'optimiser les performances de reproduction des adultes.

Tableau 26 : Rations distribuées aux vaches durant les différentes périodes, calculées avec le logiciel « Larelev » (Enjalbert 1991)

Composition	Ration avant l'entrée en stabulation	Rations pendant la stabulation		Ration début de lactation à l'herbe
		Fin de gestation	Début de lactation	
Aliments	<ul style="list-style-type: none"> Herbe de décembre ¹ 10 kg des foins 1,2 et 3 (1/3 chacun) 	12 kg de foins 1,2,3 et 4 (1/4 chacun)		Herbe de mai ¹
Nutriments ²				
UFL (/j)	7,34	7,10	8,04	14,90
UFL (/kg MS)	0,676	0,658	0,652	1,03
PDI (g/j)	739	694	793	1380
BPR (g/kg MS)	-32,10	-40,70	-40,90	35,20
MAT (g/j)	8,40	7,09	7,09	18,10
CB (g/j)	33,40	33,70	33,70	23,10
Ca_{abs} (g/j)	17,20	14,00	16,00	22,90
P_{abs} (g/j)	12,90	10,90	12,50	27,90
Mg (g/j)	21,90	19,70	22,40	36,30

¹ quantité ingérée calculée en saturant la capacité d'ingestion théorique des animaux

² en rouge figure les apports en un nutriment ne permettant pas de couvrir les besoins des animaux

2.3 Prélèvements et analyses

2.3.1 Suivi des animaux

De février à juin 2022, nous avons suivi les 8 vaches afin d'évaluer leur statut en cuivre, en zinc, en iode et en sélénium en péripartum et autour de la mise à la reproduction. Des prélèvements sanguins ont donc été réalisés :

- en fin de gestation (dans le dernier mois avant la mise-bas) ;
- en début de lactation (1 mois après la mise-bas) ;
- autour de la mise à la reproduction en monte naturelle.

Pour évaluer la capacité de transfert des oligo-éléments aux nouveau-nés, tous les veaux issus des mères incluses dans le protocole ont été prélevés à l'âge de 4 semaines (+/- 2 semaines). Entre 10 et 15 jours d'âge, les veaux ont eu un examen clinique (*Cf. Annexe 8*). Le score fécal et le dag score sont tirés respectivement des travaux de Larson et al. (1977) et de Larsen et al (1995) (*Cf. Annexe 9*). Deux vaches Aubrac (5459 et 6413) ont eu des jumeaux. La vache 5459 a perdu un de ses jumeaux avant l'âge de 3 semaines. La jumelle restante a été intégrée au protocole. Les deux autres velles jumelles (vache 6413) ont également été prélevées pour l'évaluation du statut en oligo-éléments. Au total, 8 vaches et 9 veaux ont été suivis dans ce protocole expérimental (*Cf. Annexe 10*).

Deux tubes héparinés ont été prélevés sur chaque animal, à la veine coccygienne pour les vaches et à la veine jugulaire pour les veaux. Ces prélèvements ont été réalisés entre le lundi et le mercredi pour assurer un envoi rapide aux laboratoires d'analyses. Les tubes de sang ont été centrifugés à 2 500 g pendant 5 minutes et après aliquotage, les plasmas héparinés ont été placés au réfrigérateur (+ 4 °C) jusqu'à leur envoi. Les échantillons ont été envoyés, 24h après les prélèvements et sous couvert du froid positif, à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse pour le dosage du cuivre et du zinc plasmatique (*Cf. Annexe 11*) et à Iodolab (Grézieu-la-Varenne (69)) pour le dosage de l'activité de la glutathion peroxydase érythrocytaire (GSH-pxe) et l'iode inorganique plasmatique (IIP).

Des notes d'état corporel et des notes de remplissage du rumen ont également été attribués pour chaque vache après les prélèvements de sang.

2.3.1.1 Mesure du cuivre et du zinc plasmatique

Le cuivre et le zinc plasmatique sont des indicateurs sensibles des carences alimentaires pour ces deux éléments. La zincémie reflète les apports alimentaires en zinc des jours précédents le prélèvement sanguin. Cependant, la cuprémie est dépendante des réserves hépatiques en cuivre. Le dosage du cuivre plasmatique nous informe ainsi sur des apports alimentaires en cuivre des mois précédents (170 jours). À partir de plasma hépariné, le cuivre et le zinc sont analysés par spectrométrie d'absorption atomique de flamme (Philips PU 9200) après déprotéinisation des échantillons par l'acide trichloracétique (Enjalbert et al. 2002).

2.3.1.2 Dosage de l'activité de la glutathion peroxydase érythrocytaire

Le sélénium est analysé par une méthode indirecte couramment utilisée : le dosage de l'activité enzymatique de la glutathion peroxydase érythrocytaire (GSH-pxe). La GSH-pxe dépend de la disponibilité alimentaire en sélénium sur les mois précédents le dosage. Elle est un très bon indicateur du statut en sélénium lié aux apports alimentaires.

Le laboratoire Iodolab réalise la mesure de l'activité enzymatique de la GSH-pxe à l'aide d'un kit (Ransel ND, Randox Laboratories, Crumlin, U.K.) basé sur la méthode de Paglia et Valentine (1967).

2.3.1.3 Dosage de l'iode inorganique plasmatique

La teneur en iode inorganique plasmatique (IIP) reflète directement l'apport alimentaire en iode des jours précédents le dosage, indépendamment des réserves de la thyroïde et de la fonction thyroïdienne. IIP est utilisable chez les adultes comme chez les veaux du protocole âgés de 4 semaines.

Le statut en iode est mesuré par dosage de l'iode inorganique plasmatique selon la méthode de Aumont et Tressol (1987) en utilisant la chromatographie d'échange d'ions et la réaction de Sandell et Kolthoff.

2.3.2 Suivi de la ration à base de fourrage et des parcelles de pâturage

Toute l'alimentation des animaux a été analysée durant l'étude. La ration des vaches a été suivie en parallèle des analyses en oligo-éléments de celles-ci. Nous avons alors prélevé les foins et l'herbe consommés par les 8 vaches dans les semaines/mois précédents leur prise de sang et associer leur statut en oligo-éléments à celui de leur ration.

2.3.2.1 Prélèvements et analyses des foins

Suite aux chutes de neige durant les mois de novembre et décembre 2021, les vaches, encore au pâturage, ont été complémentées avec du foin de prairie permanente. Après leur entrée en stabulation en mi-décembre 2021 et jusqu'à fin avril 2022, les vaches ont reçu exclusivement du foin de prairie permanente produit sur l'exploitation. Pour chaque parcelle récoltée, un prélèvement d'un 1 kg de foin a été réalisé et envoyé à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse pour les analyses minérales et nutritionnelles. L'envoi a été effectué sous froid positif, en début de semaine, accompagné d'une feuille de demande (Cf. Annexe 12).

2.3.2.2 Prélèvements et analyses de l'herbe des parcelles

Les parcelles pâturées par les vaches avant et après la période en stabulation ont été prélevées. L'objectif de prélèvement est de 5 poignées d'herbe par hectare.

Une méthode simple et efficace de prélèvement consiste à échantillonner les parcelles à partir de la méthode « point-transect » (DREAL PACA 2010). Il est prudent d'éviter l'entrée des parcelles et la proximité des points d'eau. Les poignées d'herbe sont coupées à 5 centimètres du sol (au-dessus de la gaine de la plante). Un sampling design est réalisé à l'aide d'un outil de données géographiques tel que (*Géoportail* 2022) (*Cf. Annexe 13*) afin de définir le positionnement des échantillonnages dans la parcelle. Nous avons ainsi un nombre de point à prélever pour obtenir un échantillonnage de la parcelle le plus homogène possible. Le prélèvement total d'herbe doit peser environ 1 kg.

Les poignées d'herbe ont été placées dans des sachets plastiques propres. Les poignées de chaque parcelle ne doivent pas être mélangées mais un mélange peut être fait au sein d'une même parcelle. Les sachets ont été conservés au congélateur jusqu'à l'envoi. Les échantillons ont été envoyés à l'ENVT, sous froid positif, pour les analyses minérales et nutritionnelles accompagnés d'une feuille de demande (*Cf. Annexe 12*).

2.3.2.3 Analyses de laboratoire de la ration

Le laboratoire d'analyses du service d'alimentation de l'ENVT a réalisé les analyses de fourrages pour l'étude :

- les analyses minérales comprenant un dosage de zinc, de cuivre, de calcium, et de magnésium. Elles ont été réalisées par spectrométrie d'absorption atomique de flamme après minéralisation des fourrages.
- les analyses nutritionnelles suivant la méthode de Weende avec mesure de la cellule brute (CB), la matière azotée totale (MAT) et la matière minérale (Mm).

Ces analyses nutritionnelles ont permis de calculer les apports nutritionnels présentés dans le tableau 26 ci-dessus.

2.4 Les analyses de données

Les données ont été analysées avec le package « car » du logiciel R version 4.1.0 (R Core Team 2022). Nous avons tout d'abord réalisé des modèles linéaires pour voir s'il existe une influence des facteurs testés sur les statuts en oligo-éléments des animaux.

Pour le statut des mères, nous avons utilisé le modèle linéaire suivant :

$[OE] = \text{Moyenne} + V + R + S + \varepsilon$, où [OE] représente la concentration de l'oligo-élément dans le plasma des vaches, V l'effet de la vache, R l'effet de la race et S l'effet du stade de production. Ces 3 effets ont été considérés comme des effets fixes. Si le stade de production a un effet significatif sur le statut en oligo-éléments de la vache, un test de wilcoxon est ajouté pour comparer 2 à 2 les 4 stades étudiés (T0 : bilan initial, FG : fin de gestation, DL : début de lactation et MR : mise à la reproduction) et voir s'il existe des différences significatives entre eux. Le T0 a été inclus seulement pour le cuivre et le zinc.

Pour le statut des veaux, nous avons utilisé le modèle linéaire suivant :

$[OE] = \text{Moyenne} + [OE] \text{ mère FG} + [OE] \text{ mère DL} + \text{âge} + R + V + \epsilon$, où [OE] représente la concentration de l'oligo-élément dans le plasma des vaches, [OE] mère FG, le statut de la mère pour cet oligo-élément en fin de gestation, [OE] mère DL, le statut de la mère pour cet oligo-élément en début de lactation, âge l'effet de l'âge du veau, R l'effet de la race et V l'effet de la vache. Ce modèle inclut en plus des 2 facteurs à effets fixes cités précédemment (V et R), 3 covariables : statut de la mère pour cet oligo-élément en fin de gestation (FG) et en début de lactation (DL) et âge du veau.

Enfin, pour chaque oligo-élément, des corrélations (Pearson) ont été recherchées entre le statut du veau d'une part et le statut de la mère en FG ou en DL d'autre part.

Les différences sont considérées comme significative si $P < 0,05$ et comme une tendance si P est compris entre 0,1 et 0,05.

3 Résultats

3.1 La teneur en minéraux des foins et l'estimation des apports

3.1.1 La ration de fin de saison de pâturage

La ration, avant l'entrée en stabulation, se compose d'herbe pâturée en décembre et de 3 foins différents. Les fourrages, en fin de période de pâturage, sont légèrement déficitaires en zinc alors que le déficit est beaucoup plus marqué pour le cuivre. En ce qui concerne l'iode et le sélénium, les apports couvrent quasiment les besoins. Pour ces deux oligo-éléments, nous avons travaillé avec des apports estimés à partir des tables INRA (INRAe 2019). Les apports réels en calcium et en magnésium par cette ration sont déficitaires (Cf. *Tableau 27*).

Tableau 27 : Estimation des apports en oligo-éléments, en calcium et en magnésium de la ration avant l'entrée en stabulation

			Cuivre	Zinc	Iode	Sélénium	Calcium	Magnésium
Ration	Quantité ingérée	Unité	Apport réel	Apport réel	Apport estimé ¹	Apport estimé ¹	Apport réel	Apport réel
Herbe de décembre	10 kg MB soit 1,3 Kg MS	mg/kg de MS	3,08	37,37	0,1	0,02	4 770	1 610
		mg/j	4,01	48,58	0,13	0,03	6 200	2 090
Foins 1,2 et 3	10 kg de MB de foin soit 9,04 kg de MS	mg/kg de MS (moyenne des 3 foins)	4,17	22,82	0,1	0,02	4 120	1 950
		mg/j	37,67	206,26	0,90	0,18	37 231	17 665
Seau de minéraux	33 g	mg	0	198	4	0,8	3 300	1 320
	Apport total	mg/j	41,68	452,84	5,03	1,01	46 732	21 078
		mg/kg de MS/j	4,03	43,79	0,487	0,097	4 520	2 039
	Apport recommandé	mg/kg de MS/j	10	50	0,5	0,1	6 500	2 500
	Conclusion		Déficit majeur	Déficit léger	Déficit léger	Déficit léger	Déficit majeur	Déficit léger

¹ apport estimé de la table INRA (INRAe 2019)

3.1.2 La ration pendant la stabulation

En stabulation, les vaches reçoivent 4 foins différents distribués en quantité équivalente. On peut voir que l'apport en oligo-éléments durant la fin de gestation et le début de lactation est très déficitaire. Les apports en calcium et en magnésium par cette ration sont également déficitaires (Cf. *Tableau 28*).

Tableau 28 : Estimation des apports en oligo-éléments, en calcium et en magnésium de la ration distribuée en stabulation

Ration	Quantité ingérée	Unité	Cuivre	Zinc	Iode	Sélénium	Calcium	Magnésium
			Apport réel	Apport réel	Apport estimé ¹	Apport estimé ¹	Apport réel	Apport réel
Foins 1,2,3 et 4	12 kg de MB de foin soit 10,9 kg de MS	mg/kg de MS (moyenne des 4 foins)	3,88	20,93	0,1	0,02	3 640	1 780
		mg/j	42,29	228,09	1,09	0,22	39 697	19 351
Seau de minéraux	12 g	mg	0	72	1,5	0,3	1 200	4 800
	Apport total	mg/j	42,29	300,09	2,59	0,52	40 898	24 151
		mg/kg de MS/j	3,88	27,53	0,24	0,05	3 752	2 216
	Apport recommandé	mg/kg de MS/j	10	50	0,5	0,1	6 500	2 500
	Conclusion		Déficit majeur	Déficit majeur	Déficit majeur	Déficit majeur	Déficit majeur	Déficit léger

¹ apport estimé de la table INRA (INRAe 2019)

3.1.3 La ration au pâturage de printemps

Nous avons analysé l'herbe des pâturages de printemps. Cette jeune herbe est pauvre en oligo-éléments. Les apports journaliers recommandés ne sont pas couverts. Les apports en calcium et en magnésium par cette ration sont également déficitaires (Cf. *Tableau 29*).

Tableau 29 : Estimation des apports en oligo-éléments, en calcium et en magnésium de la ration de début de lactation à l'herbe

Ration	Quantité ingérée	Unité	Cuivre	Zinc	Iode	Sélénium	Calcium	Magnésium
			Apport réel	Apport réel	Apport estimé ¹	Apport estimé ¹	Apport réel	Apport réel
Herbe de mai	20 kg de MS	mg/kg de MS	6	26,83	0,1	0,02	4 230	2 420
		mg/j	120	536,6	2	0,4	84 600	48 400
Seau de minéraux	33 g	mg	0	198	4	0,8	3 300	1 320
	Apport total	mg/j	120	734,6	6	1,2	87 900	49 720
		mg/kg de MS/j	6	36,73	0,3	0,06	4 395	2 486
	Apport recommandé	mg/kg de MS/j	10	50	0,5	0,1	6 500	2 500
	Conclusion		Déficit moyen	Déficit moyen	Déficit moyen	Déficit moyen	Déficit moyen	Déficit léger

¹ apport estimé de la table INRA (INRAe 2019)

3.2 Le statut en oligo-éléments des mères

Le tableau 30 nous montre que les vaches retenues pour notre essai sont très carencées en cuivre, en zinc et en sélénium. En ce qui concerne l'iode, quel que soit le stade physiologique, au moins 75 % des mères présentent un taux en iode inorganique plasmatique inférieur au seuil de détection (< 15 µg/L). Ces fortes carences ne permettent donc pas des dosages précis. Les autres mères sont également carencées (< 80 µg/L). Ainsi, pour la suite de l'étude sur le statut des mères, nous nous intéresserons seulement à la cuprémie, à la zincémie et l'activité enzymatique de la GSH-pxe, car l'absence d'un dosage précis ne nous permet pas de faire les analyses statistiques.

Tableau 30 : Cuprémie, zincémie et activité enzymatique de la glutathion peroxydase des mères suivant les stades physiologiques (moyenne +/- écart-type)

		Cuivre (µmol/L)	Zinc (µmol/L)	GSH-pxe (U/gHb)
Valeurs expérimentales	T0	9,04 +/- 0,83	4,00 +/- 1,10	-
	Fin de gestation	11,45 +/- 1,16	3,33 +/- 1,18	73 +/- 61,00
	Début de lactation	6,71 +/- 0,98	12,41 +/- 2,43	94,38 +/- 62,19
	Mise à la reproduction	5,96 +/- 0,68	11,45 +/- 2,17	109,14 +/- 49,20
Seuil de subcarence		8 - 11	12 - 14	75 - 150
Seuil de carence		< 8	< 12	< 75

3.2.1 Le statut en cuivre des mères

Les mères sont carencées en cuivre sur toute la période d'étude (Cf. Figure 28), à l'exception d'augmentation significative (P < 0,01) pour le prélèvement de fin de gestation par rapport aux autres. . En début de lactation, la cuprémie chute de manière significative (P < 0,01) sous le seuil de carence. Le statut en cuivre à la mise à la reproduction reste déficitaire.

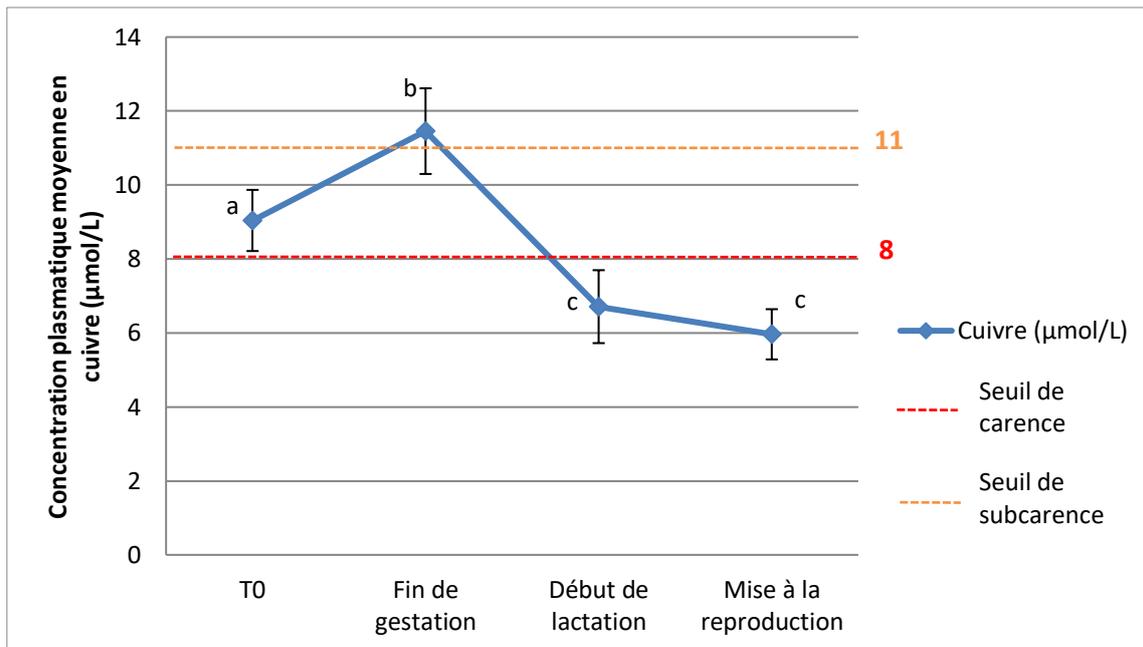


Figure 28 : Evolution de la concentration plasmatique moyenne en cuivre (+/- écarts-types) chez les mères en fonction des stades de production. a, b et c représentent une différence significative de $P < 0,01$. Les seuils sont tirés de l'article de Enjalbert, Alves de Oliveira et Lebreton (2009).

3.2.2 Le statut en zinc des mères

Le statut en zinc est effondré en fin de gestation (Cf. Figure 29). On peut observer une augmentation très significative ($P < 0,001$) entre la fin de gestation et le début de lactation. Malgré cette augmentation, les mères sont toujours carencées en zinc.

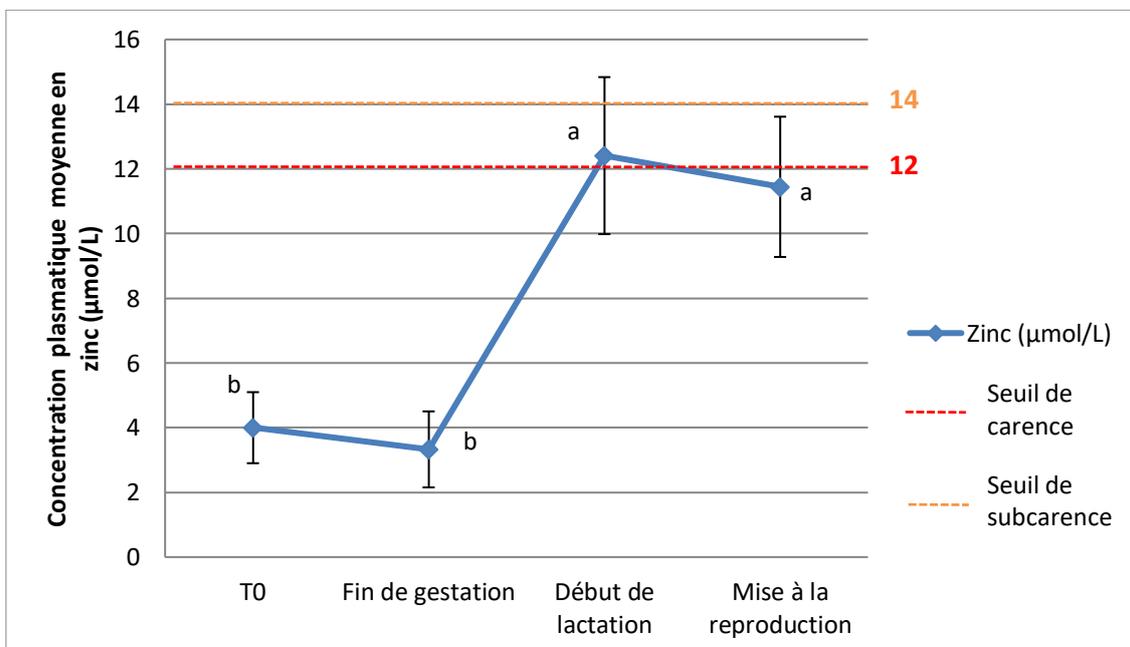


Figure 29 : Evolution de la concentration plasmatique moyenne en zinc (+/- écarts-types) chez les mères en fonction des stades de production. a et b représentent une différence significative de $P < 0,001$. Les seuils sont tirés de l'article de Enjalbert, Alves de Oliveira et Lebreton (2009).

3.2.3 Le statut en sélénium des mères

L'activité enzymatique de la GSH-pxe se situe sous le seuil de subcarence ([GSH] < 150 U / gHb). Ce marqueur à long terme du statut en sélénium montre que les mères sont carencées en sélénium quel que soit le stade physiologique. Il n'y a pas de différence significative pour l'activité enzymatique de la GSH-pxe entre les 3 prélèvements (P=0,91 ; Cf. Figure 30). Cependant, un effet race a été relevé. Les vaches Salers sont significativement plus carencées en sélénium que les vaches Aubrac : 54,4 +/-29,29 U/gHb vs 143,6 +/- 58,16 U/gHb respectivement (P = 0,017).

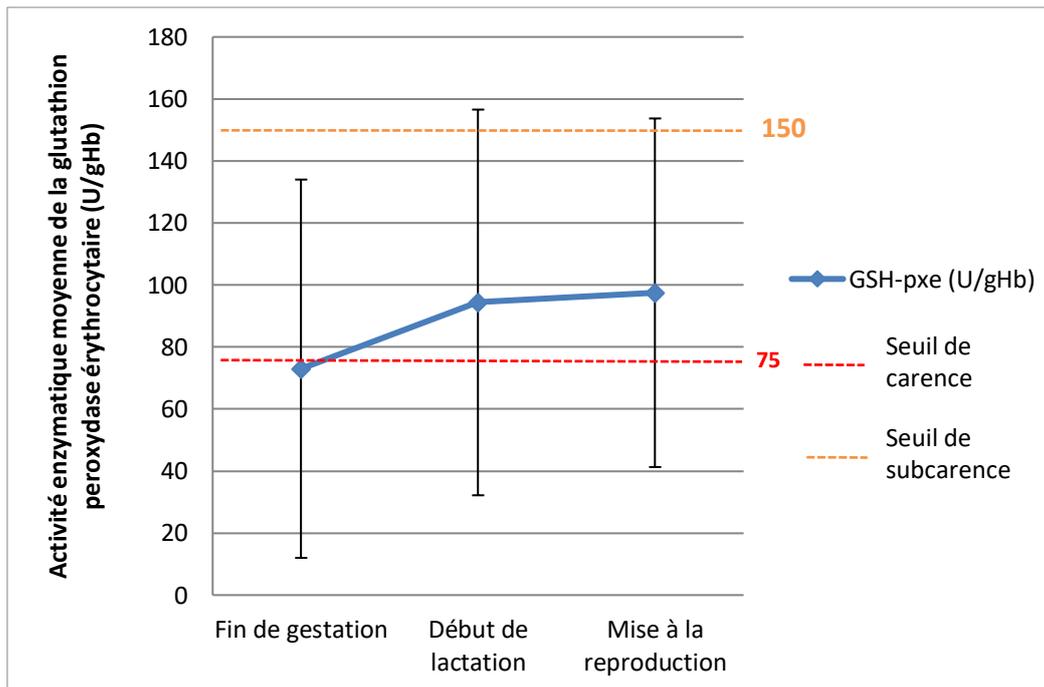


Figure 30 : Evolution de l'activité enzymatique moyenne de la glutathion peroxydase érythrocytaire (+/- écarts-types) chez les mères en fonction des stades de production. Les seuils sont tirés de l'article de Enjalbert, Alves de Oliveira et Lebreton (2009).

3.2.4 La note d'état corporel et de remplissage du rumen des mères

La figure 31 nous montre l'évolution des notes d'état corporel des mères au cours des stades physiologiques. Les vaches Salers ont une NEC inférieure à celle des vaches Aubrac. Les vaches Salers maigrissent de manière importante entre l'entrée en stabulation et la mise à la reproduction. On peut remarquer également que les NEC sont très hétérogènes pour le groupe des vaches Salers. Les vaches Aubrac perdent moins de 0,5 point de NEC autour du vêlage qu'elles reprennent quasiment à la mise à la reproduction.

En ce qui concerne la note de remplissage de rumen, les vaches retenues pour notre essai a globalement une NRR autour de 4.

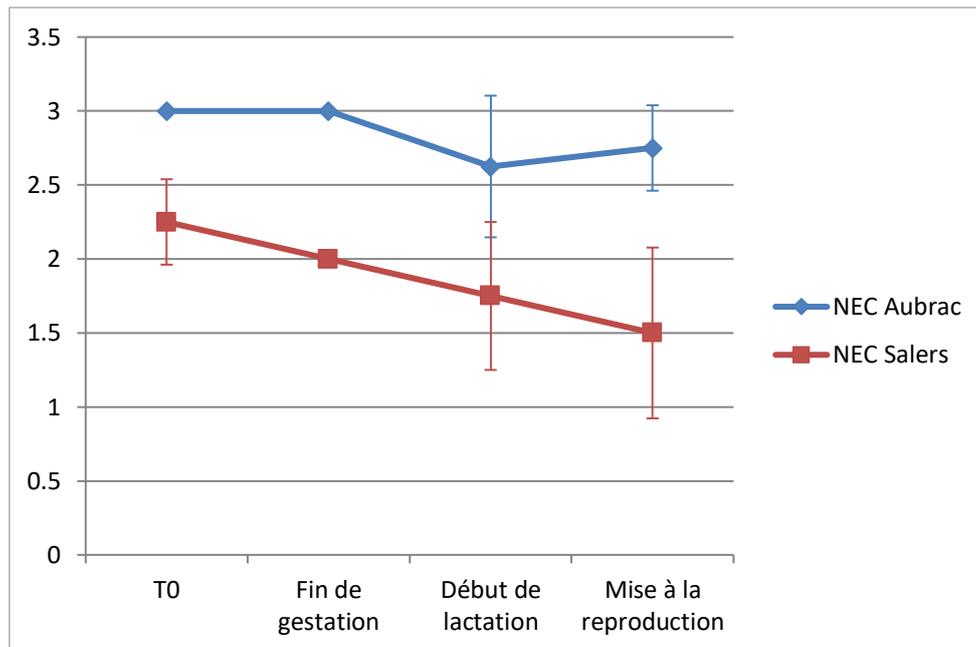


Figure 31 : Notes d'état corporel (NEC) moyennes des mères réparties selon les races en fonction des stades physiologiques

3.3 Le statut en oligo-éléments des veaux

Les veaux issus des mères retenues pour cette étude sont à la limite inférieure de la plage physiologique des concentrations plasmatiques en cuivre et en zinc. Ils sont très légèrement carencés en sélénium (Cf. Tableau 31). Tous les veaux sont carencés en iode inorganique plasmatique et 83,3 % des veaux présentent un taux en IIP inférieur au seuil de détection (< 15 µg/L). Pour des questions de précision des dosages, nous ne nous intéressons pas au taux en IIP des veaux dans la suite de l'étude.

Tableau 31 : Cuprémie, zincémie et activité enzymatique de la glutathion peroxydase des veaux prélevés en début de lactation (moyenne +/- écart-type)

	Cuivre (µmol/L)	Zinc (µmol/L)	GSH-pxe (U/gHb)
Valeur expérimentale	13,74 +/- 4,29	14,90 +/- 3,19	147 +/- 70,70
Plage physiologique	11 - 18	> 14	> 150
Seuil de subcarence	8 - 11	12 - 14	75 - 150

3.3.1 Les effets des facteurs sur les teneurs en oligo-éléments des veaux

Tableau 32 : Niveau de significativité des effets des facteurs testés chez les veaux

	Effet du statut de la mère en FG	Effet du statut de la mère en DL	Effet Age	Effet Race	Effet Vache	R ²
Cuivre	0,572	0,480	0,851	0,687	0,423	0,76
Zinc	0,827	0,088	0,736	0,295	0,256	0,83
GSH-pxe	0,534	0,491	0,675	0,076	0,813	0,88

Il n'y a pas d'effets significatifs des différents facteurs sur les concentrations plasmatiques en cuivre des veaux. Nous pouvons observer une tendance ($P = 0,088$) de l'effet du statut en zinc des mères sur la concentration plasmatique en zinc chez les veaux (Cf. Tableau 32). Le statut en zinc du veau dépend principalement du statut de la mère en début de lactation c'est-à-dire évalué le même jour que lui. Enfin, l'effet race tend à être significatif aussi pour l'activité enzymatique de la GSH-pxe des veaux. Les veaux croisés Salers sont plus carencés en sélénium que les veaux Aubrac ($79 \pm 27,14$ U/gHb vs $201,4 \pm 33,48$ U/gHb respectivement).

3.3.2 L'état de santé des veaux

Nous nous sommes également intéressés à l'état de santé des veaux du protocole. Les examens cliniques lors des prises de sang nous ont permis de constater que le score fécal moyen chez nos veaux est de $2,33 \pm 0,70$ et que le dag score moyen est de $1,55 \pm 1,24$. De plus, 5 veaux sur 9 ont reçu un traitement pour la diarrhée. Ce dernier a coûté en moyenne $40,56 \text{ €}^{\text{TTC}}$ par veau. En plus de ces veaux atteints de troubles digestifs, un veau a eu des troubles respiratoires nécessitant un traitement ($4,44 \text{ €}^{\text{TTC}}$) et un autre a présenté une omphalite ($2,56 \text{ €}^{\text{TTC}}$). Au total, les neuf veaux du protocole ont coûté $209,78 \text{ €}^{\text{TTC}}$ en frais vétérinaires. Ainsi, le taux de morbidité chez nos veaux est de 78 % avec un taux de létalité et de mortalité de 0 %.

3.4 La relation entre le statut de la mère et du veau

Les concentrations sanguines en oligo-éléments sont plus importantes chez les veaux par rapport à celles de leurs mères (Cf. Tableau 33).

Tableau 33 : Concentration en oligo-éléments des mères en fin de gestation pour le cuivre et en début de lactation pour le zinc et la GSH-pxe et concentration en oligo-éléments des veaux en début de lactation (moyenne +/- écart-type)

	Cuivre (µmol/L)	Zinc (µmol/L)	GSH-pxe (U/gHb)	
			Salers	Aubrac
Vaches	11,40 +/- 1,15	12,41 +/- 2,43	54,5 +/- 29,29	134,6 +/- 62,67
Veaux	15,41 +/- 3,14	14,91 +/- 3,19	79 +/- 27,14	201,4 +/- 33,48

Pour le statut en cuivre, deux veaux ont des valeurs inférieures au groupe (2110 : 7,88 µmol/L et 2109 : 7,91 µmol/L). Ces deux veaux Aubrac sont des jumeaux issus de mères différentes (5459 et 6413 respectivement). En les retirant des calculs de corrélation de Pearson, une tendance est obtenue entre le statut en cuivre du veau et celui de leur mère en fin de gestation (P = 0,09). Il existe donc une relation linéaire entre le statut en cuivre du veau et celui de leur mère en fin de gestation ($R^2 = 0,466$; $P < 0,1$) (Cf. Figure 32).

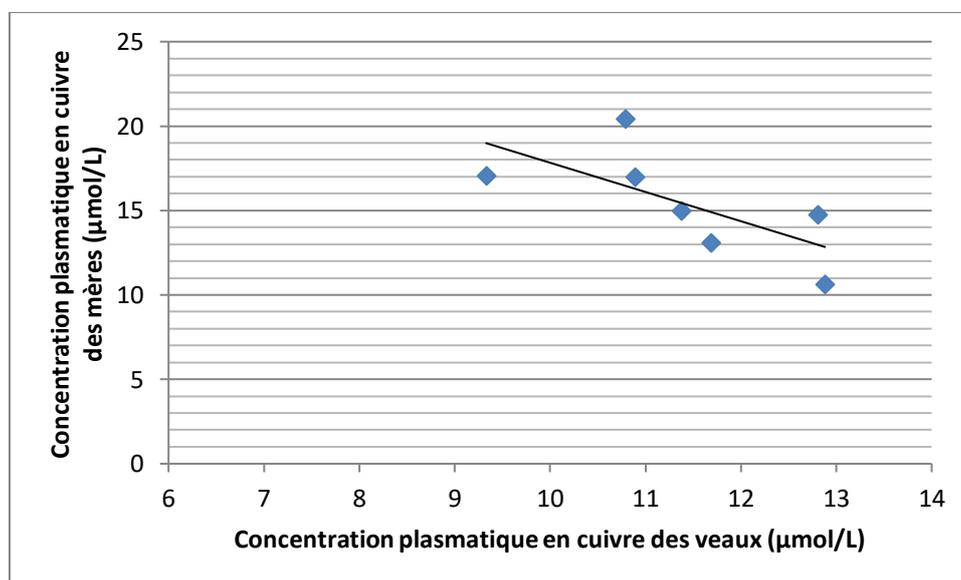


Figure 32 : Concentration plasmatique en cuivre des mères en fin de gestation en fonction du statut des veaux [Cu]mère = -1,731 x [Cu]veau + 35,14 ($R^2 = 0,466$; $P = 0,09$ et cor = -0,683)

La concentration plasmatique en zinc du veau est significativement liée à celle de la mère prélevée le même jour ($R^2 = 0,636$; $P = 0,01$). Le statut en zinc du veau dépend de celui de sa mère en début de lactation (Cf. Figure 33).

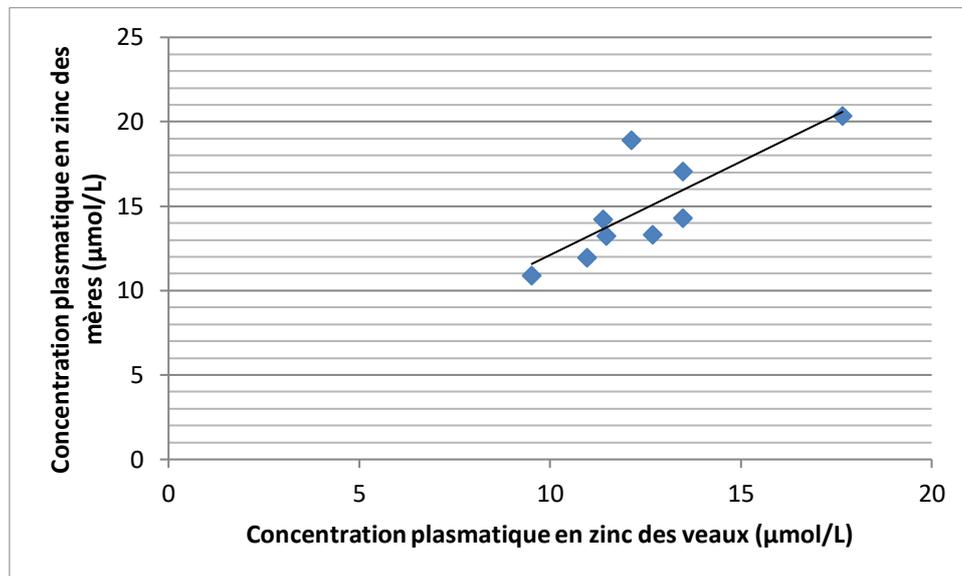


Figure 33 : Concentration plasmatique en zinc des mères en début de lactation en fonction du statut des veaux $[Zn]_{\text{mère}} = 1,106 \times [Zn]_{\text{veau}} + 1,046$ ($R^2 = 0,636$; $P = 0,01$; $\text{cor} = 0,798$)

Le statut en sélénium des veaux est lié à celui de leur mère, prélevés au même moment ($R^2 = 0,558$; $P = 0,02$) (Cf. Figure 34).

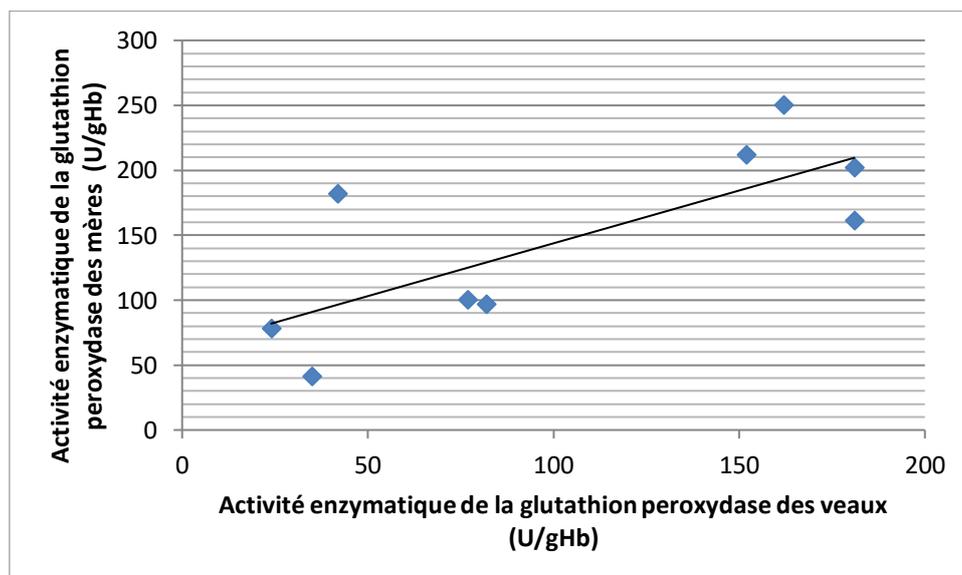


Figure 34 : Activité enzymatique de la glutathion peroxydase des mères en début de lactation en fonction de celle des veaux $\text{GSH-pxe (mère)} = 0,813 \times \text{GSH-pxe (veau)} + 62,42$ ($R^2 = 0,558$; $P = 0,02$; $\text{cor} = 0,747$)

4 Discussion

4.1 La teneur en oligo-éléments dans les rations

Les rations des vaches allaitantes basées sur les fourrages et le pâturage sont pauvres en oligo-éléments. Les dosages de calcium et de magnésium nous montrent que les fourrages sont également déficitaires pour ces deux minéraux. Il est donc tout à fait normal que les vaches soient carencées en oligo-éléments. Cette carence peut être qualifiée de primaire car le principal facteur défavorable à l'absorption des oligo-éléments (calcium (Lamand 1991)) est déficitaire. Or, la pullulation des rats-taupiers, dans les parcelles de fauche, a engendré des quantités très importantes de terre dans les foin. La présence de terre peut induire une baisse marquée de la digestibilité des oligo-éléments (Meschy 2017), notamment en cuivre et en zinc (NRC 2001; Lamand et al. 1979). La carence primaire pour ces deux oligo-éléments peut être aggravée par une faible digestibilité. Par ailleurs, étant donné que les prises de sang, en fin de gestation et en début de lactation, ont été réalisées en dehors de la période de péripartum, le stress engendré par le vêlage n'a pas pu influencer les valeurs de zincémie et de cuprémie.

Pour ce qui est de l'iode et le sélénium, les apports estimés à partir des tables INRA sont légèrement déficitaires. Les fourrages de la région disponibles dans ces tables sont mieux pourvus en cuivre et en zinc que ceux que nous avons prélevés dans cet élevage. On peut considérer que les apports théoriques en sélénium sont surestimés. En réalité, nos fourrages seraient donc pauvres en sélénium. Pour l'iode, nous avons également remarqué qu'il n'existe pas de fourrages avec des valeurs en dessous de 0,1 mg/kg de MS dans les tables. On peut donc émettre comme hypothèse que cette valeur est un seuil de détection de l'iode dans les fourrages. L'apport en iode par cette ration peut également être surestimé.

De plus, l'AMV apporté aux animaux ne permet pas de combler ce déficit. Les vaches ne consomment pas assez de seaux à lécher pour compléter le déficit en oligo-éléments des fourrages. On pourrait penser qu'il suffit seulement de mettre plus de seaux à disposition. Cependant, ces seaux n'apportent pas de cuivre et les fourrages sont déficitaires en cet oligo-élément. Une autre complémentation doit être mise en place.

Enfin, une NRR globale de 4 montre que les vaches ont une ingestion de matière sèche très correcte. Cependant, les rations distribuées en fin de gestation et en début de lactation sont déficitaires en énergie. Cela induit une chute marquée de la NEC chez les vaches Salers (Cf. Figure 31). Les vaches Aubrac semblent moins sensibles au déficit énergétique de ces rations. La ration au pâturage de printemps correspond à la phase de mise à la reproduction. Cette ration excédentaire en énergie permet aux vaches Aubrac de refaire leur réserve. Ce n'est pas le cas pour les vaches Salers. Ces dernières ont des NEC faibles à la mise à l'herbe. De plus, les mesures ont été réalisées peu de temps après la sortie de stabulation. Ainsi, les Salers ont peut-être besoin de plus de temps pour refaire leurs réserves graisseuses, puisque les IVV sont bons pour les 2 races. De plus, les subcarences en oligo-éléments auraient peu

d'effet sur la reproduction. La monte naturelle permet également une meilleure fécondation des vaches allaitantes par rapport à l'insémination artificielle.

4.2 La relation entre le statut en oligo-éléments des mères et de leur veau

4.2.1 Le statut en cuivre

En fin de gestation, le veau est prioritaire par rapport aux besoins de sa mère. On retrouve un lien entre le statut du veau en début de lactation et le statut des mères en fin de gestation (Cf. *Figure 32*). Cela correspond à la littérature (Gooneratne, Christensen 1989a; Xin et al. 1993; Pryor 1964). En fin de gestation, le cuivre va s'accumuler dans le foie du fœtus pour constituer ses réserves, essentielles aux premiers jours de vie du jeune, au détriment de la mère. Nous avons alors observé une augmentation de la concentration plasmatique en cuivre en fin de gestation chez les mères pour assurer un transfert vers le veau (Cf. *Figure 28*).

Ce lien entre le statut du veau et celui de sa mère reste faible dans notre étude. Cela pourrait être expliqué par une carence majeure en cuivre chez les vaches retenues pour notre essai. Il serait alors intéressant de confirmer cette tendance avec un nombre plus important d'animaux prélevés et un statut en cuivre mieux maîtrisé.

Enfin, le statut des mères en cuivre chute de manière très importante entre la fin de gestation et le début de lactation (Cf. *Figure 28*). Étant donné que la ration en fin de gestation est très déficitaire en cuivre, les mères doivent mobiliser leur réserve hépatique pour couvrir les besoins en cuivre de leur fœtus. En début de lactation, les mères n'ont peut-être plus de réserve hépatique ou arrêtent de la mobiliser car trop faible et leur cuprémie chute. Elles sont alors très carencées en cuivre.

4.2.2 Le statut en zinc

Le statut du veau en zinc est très dépendant du statut de sa mère prélevé le même jour, c'est-à-dire en début de lactation. Son statut résulte donc du transfert des oligo-éléments par le lait (Cf. *Figure 33*). Ces résultats sont cohérents avec la bibliographie (Guyot 2013). Cependant, nous avons constaté que le statut des mères en fin de gestation n'a pas eu d'influence sur celui de leur veau, ce qui diffère des données bibliographiques (Gooneratne, Christensen 1989b; Hidirolou 1980) Cela peut s'expliquer par une forte carence en zinc lors du bilan initial et en fin de gestation. Les veaux peuvent donc couvrir leur besoin en zinc avec le lait. Ce transfert paraît efficace car à l'âge de 1 mois, le statut en zinc des veaux est correct.

La très faible zincémie observée avant la mise-bas ne se retrouve pas dans la bibliographie (Pryor 1976; Goff, Stabel 1990; Dufty, Bingley, Cove 1977) (Cf. *Figure 29*). Les différents travaux sont réalisés généralement sur des vaches laitières non carencées

contrairement à notre troupeau. Étant donné que les bovins n'ont pas véritablement d'organe de réserve pour le zinc, l'apport alimentaire carencé en zinc engendre des valeurs faibles en zinc plasmatique. Toutefois, si nous regardons les rations des animaux en fin de gestation, les apports sont déficitaires mais ce déficit n'est pas majeur. On peut alors se demander si les animaux n'ont pas subi un stress qui pourrait expliquer la très faible zincémie, à l'entrée en stabulation. Tian et al. (2014) ont montré que le stress physiologique (un choc électrique (0,6 mA pendant 1 s) pendant 30 min (60 fois)) chez le rat a provoqué une accumulation du zinc dans le foie essentiellement sous forme de métallothionéines. Si un stress a provoqué une séquestration du zinc dans le foie des bovins, la cause reste à être déterminée. Des changements de pâture, des faibles réserves en herbe sur les pâturages d'hiver, l'entrée en stabulation... sont des hypothèses qui auraient provoqué ce stress. Pour confirmer cette accumulation de zinc dans le foie des biopsies hépatiques doivent être réalisées.

4.2.3 Le statut en sélénium

Comme nous l'avons vu dans la partie bibliographie, étant donné la demi-vie des hématies, l'activité enzymatique de la GSH-pxe reflète l'alimentation en sélénium apporté avec un délai de quelques mois. Le statut des animaux en début de lactation dépend de la teneur en sélénium des fourrages consommés au pâturage et en tout début de période en stabulation. Les rations durant ces deux périodes sont carencées en sélénium. Il est donc normal que les vaches retenues pour notre essai soient carencées en sélénium (Cf. Figure 30).

Le statut des veaux est lié au statut des mères prélevées au même moment (Cf. Figure 34), ce moment rendant compte d'une situation alimentaire *ante*. Les veaux sont comme leur mère, carencés en sélénium.

Par ailleurs, nous avons remarqué un effet race sur l'activité de la GSH-pxe. Les vaches Salers sont plus carencées que les vaches Aubrac. C'est également le cas pour les veaux (Cf. Tableau 32). Cela confirme le lien entre le statut des mères et celui de leur veau.

Cependant, nous avons constaté que le statut en sélénium des mères en fin de gestation n'a pas eu d'influence sur celui de leur veau, ce qui diffère des données bibliographiques (Van Saun, Herdt, Stowe 1989; Enjalbert et al. 1999). Nos résultats semblent être biaisés par les carences sévères chez nos vaches. Enfin, nos résultats doivent être confirmés avec un nombre plus grand de couple mère-veau.

Globalement, les statuts en oligo-éléments des veaux sont supérieurs à ceux de leur mère, rendant compte de la priorité qui est accordé à celui-ci d'un point de vue métabolique, par rapport à l'organisme de sa mère. À l'âge d'un mois, le statut en cuivre et en zinc des veaux est correct alors qu'ils sont carencés légèrement en sélénium et en iode. Le statut carencé global en oligo-éléments du troupeau est probablement à l'origine des

troubles pathologiques notables chez les veaux avec un taux de morbidité et des frais vétérinaires élevés.

L'amélioration des statuts en oligo-éléments chez les mères est donc un levier pour améliorer la santé des veaux et réduire les coûts en médicaments vétérinaires.

4.3 Quelques aspects technico-économiques

Les rations de notre système herbager ne permettent donc pas de couvrir les besoins en oligo-éléments des vaches allaitantes. Par conséquent, les veaux présentent des carences impactant de manière négative leur santé. Le taux élevé de morbidité (78 %) engendre des coûts importants en médicaments vétérinaires (209,78 €^{TTC} de frais vétérinaires pour les 9 veaux). Une complémentation adéquate en oligo-éléments permettrait de prévenir les maladies et de diminuer l'utilisation des antibiotiques. Les seaux à lécher sont pratiques sur le terrain pour mettre en place une complémentation en oligo-éléments mais ils ne permettent pas toujours de couvrir les besoins des vaches menées en système herbager (apports insuffisants ou oligo-éléments absents comme le cuivre dans nos seaux). La mise en place de bolus intra-ruminaux individuels peut être une solution. Ils permettraient de sécuriser les apports en oligo-éléments. Nous avons vu que les besoins chez la mère comme chez le fœtus augmentent en fin de gestation. Les éleveurs pourraient alors mettre en place les bolus 2 mois avant la mise-bas, ce qui permettrait de couvrir les besoins de la fin de gestation jusqu'au début de la lactation. Les bolus pour nos 8 vaches coûteraient environ 100 €^{TTC} alors que les seaux à lécher coûtent 220 €^{TTC} pour la même période. Cette estimation nous montre bien que les seaux à lécher coûtent plus cher. En plus d'une sécurité d'apport, le bolus semble être une solution économique. Cependant, cette forme de distribution demande de la main d'œuvre, du temps et des moyens de contention (parc avec couloir de contention, cornadis). L'idéal est de compléter en oligo-éléments les vaches de manière régulière, avec la mise en place de seaux à lécher de meilleure qualité et en quantité suffisante, puis de mettre en place des bolus en fin de gestation pour couvrir l'augmentation des besoins lors de cette période critique pour le couple mère-veau.

Une autre solution est d'utiliser des seaux à lécher équilibrés en minéraux et adaptés pour l'élevage en système herbager. Les déficits importants des fourrages demandent des formules riches en oligo-éléments qui respectent également la législation (*Cf. Annexe 3*). Les formules existantes sont donc à revoir et à adapter en fonction des régions (notamment pour l'iode dans le Massif Central). Ces seaux seront évidemment plus chers. Malgré la reformulation des seaux, la hiérarchie dans les troupeaux de bovins engendre tout de même un accès limité à la complémentation minérale pour les vaches dominées.

Face à l'augmentation des prix des matières premières, l'utilisation d'une complémentation en oligo-éléments est donc à réfléchir. Apporter des oligo-éléments est essentiel pour la santé des mères et surtout des veaux.

CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons étudié quatre oligo-éléments : le cuivre, le zinc, l'iode et le sélénium, indispensables au bon fonctionnement du métabolisme et essentiels pour les mécanismes physiologiques des animaux. Ces oligo-éléments sont transférés de la mère au fœtus, de manière efficace, par voie transplacentaire. La période de péripartum est une phase critique pour la mère et son futur veau. En fin de gestation et en début de lactation, le fœtus est prioritaire par rapport à sa mère en termes de besoin en oligo-éléments. Leurs apports au cours des derniers mois de gestation permettent également la synthèse d'un colostrum de bonne qualité. Ils vont soutenir le système immunitaire des mères mis à rude épreuve autour du vêlage. Les apports alimentaires doivent être suffisants pour couvrir les besoins de la mère et ceux du fœtus. Les élevages allaitants valorisant leur système herbager sont très répandus en France. Cependant, les fourrages d'herbe sont très pauvres en oligo-éléments. Les carences sont très largement retrouvées dans ces élevages. Les dosages sanguins chez les animaux permettent de connaître le statut du troupeau. Ces analyses peuvent être complétées par une mesure des teneurs des fourrages car de nombreux facteurs peuvent les faire varier. La complémentation en minéraux doit alors être adaptée.

Notre expérimentation a été réalisée dans d'un élevage de bovins allaitants valorisant un système herbager. L'objectif est d'évaluer le statut en cuivre, zinc, iode et sélénium chez des vaches multipares autour de la mise-bas alimentées exclusivement avec des fourrages à base d'herbe. Les rations déficitaires en oligo-éléments ne permettent pas de couvrir les besoins des animaux. Les vaches sont carencées mais le statut de leur veau est correct un mois après la mise-bas. Cependant, le taux de morbidité des jeunes est élevé. Les carences chez les mères entraînent alors une baisse de l'immunité de leur veau. La complémentation doit être adaptée aux rations tout en prenant en compte de la difficulté de leur distribution au pâturage.

La micro-nutrition fait partie intégrante des plans de prévention dans les élevages pour la maîtrise de la santé du troupeau au même titre que la vaccination et les antiparasitaires. Une utilisation raisonnée des oligo-éléments permet alors de prévenir les maladies des jeunes et d'optimiser les performances du troupeau adulte.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELRAHMAN, M. M. et KINCAID, R. L., 1993. Deposition of copper, manganese, zinc, and selenium in bovine fetal tissue at different stages of gestation. *Journal of Dairy Science*. novembre 1993. Vol. 76, n° 11, pp. 3588-3593. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(93)77698-5.
- ABDELRAHMAN, M. M. et KINCAID, R. L., 1995. Effect of selenium supplementation of cows on maternal transfer of selenium to fetal and newborn calves. *Journal of Dairy Science*. mars 1995. Vol. 78, n° 3, pp. 625-630. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(95)76673-5.
- ALDERMAN, G. et JONES, D. I. H., 1967. The iodine content of pastures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1967. Vol. 18, n° 5, pp. 197-199. DOI 10.1002/jsfa.2740180506.
- ALDERMAN, G. et STRANKS, M. H., 1967. The iodine content of bulk herd milk in summer in relation to estimated dietary iodine intake of cows. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1967. Vol. 18, n° 4, pp. 151-153. DOI 10.1002/jsfa.2740180404.
- ALEXANDER, G., BELL, A. W. et WILLIAMS, D., 1970. Metabolic response of lambs to cold. Effects of prolonged treatment with thyroxine, and of acclimation to low temperatures. *Biology of the Neonate*. 1970. Vol. 15, n° 34, pp. 198-210. DOI 10.1159/000240226.
- AMBOULOU, D. et LAMAND, M., 1977. Variations in the digestibility of trace elements (Cu, Zn and Mn) during the first cycle of cocksfoot growth. *Annales de Recherches Veterinaires*. 1977. Vol. 8, n° 3, pp. 241-249.
- ANDRIEU, S., 2008. Is there a role for organic trace element supplements in transition cow health? *The Veterinary Journal*. 1 avril 2008. Vol. 176, n° 1, pp. 77-83. DOI 10.1016/j.tvjl.2007.12.022.
- ARTHINGTON, John, 2003. Copper antagonists in cattle nutrition. [en ligne]. 2003. Disponible à l'adresse : <https://www.semanticscholar.org/paper/Copper-Antagonists-in-Cattle-Nutrition-Arthington/18fc7922bd6286a20c30305d44471cf74e90d81a>.
- ARTHUR, John R., NICOL, Fergus, BECKETT, Geoffrey J. et TRAYHURN, Paul, 1991. Impairment of iodothyronine 5'-deiodinase activity in brown adipose tissue and its acute stimulation by cold in selenium deficiency. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*. juin 1991. Vol. 69, n° 6, pp. 782-785. DOI 10.1139/y91-117.
- ATANASIU, R. L., STEA, D., MATEESCU, M. A., VERGELY, C., DALLOZ, F., BRIOT, F., MAUPOIL, V., NADEAU, R. et ROCHETTE, L., 1998. Direct evidence of caeruloplasmin antioxidant properties. *Molecular and Cellular Biochemistry*. décembre 1998. Vol. 189, n° 1-2, pp. 127-135. DOI 10.1023/a:1006945713860.

AUBERT, Huguette et PINTA, Maurice, 1977. *Trace elements in soils*. Amsterdam; New York : Published for O.R.S.T.O.M. by Elsevier Scientific Pub. Co. ISBN 978-0-444-41511-0.

AUMONT, Gilles et TRESSOL, Jean-Claude, 1987. Rapid method for the direct determination of inorganic iodine in plasma using ion-exchange chromatography and the Sandell and Kolthoff reaction. *Analyst*. 1 janvier 1987. Vol. 112, n° 6, pp. 875-878. DOI 10.1039/AN9871200875.

AUSTIN, A. R., WHITEHEAD, D. C., LE DU, Y. L. et BROWNLIE, J., 1980. The influence of dietary iodine on iodine in the blood serum of cows and calves in the perinatal period. *Research in Veterinary Science*. janvier 1980. Vol. 28, n° 1, pp. 128-130.

AUZA, N., 1983. LE CUIVRE CHEZ LES RUMINANTS. UNE REVUE. *Annales de Recherches Vétérinaires*. 1983. Vol. 14, n° 1, pp. 21-37.

AWADEH, F. T., KINCAID, R. L. et JOHNSON, K. A., 1998. Effect of level and source of dietary selenium on concentrations of thyroid hormones and immunoglobulins in beef cows and calves. *Journal of Animal Science*. avril 1998. Vol. 76, n° 4, pp. 1204-1215. DOI 10.2527/1998.7641204x.

BELLANGER, J., 1971. DOSAGE DES OLIGO-ÉLÉMENTS DANS LES FOURRAGES. *Annales de la nutrition et de l'alimentation*. 1971. Vol. 25, pp. B59-B93.

BELLANGER, J., LAMAND, M. et PÉRIGAUD, Simone, 1970. LA CARENCE EN CUIVRE CHEZ LES RUMINANTS. *Annales de la nutrition et de l'alimentation*. 1970. Vol. 24, pp. 1-62.

BELLANGER, J., PÉRIGAUD, Simone et LAMAND, M., 1973. Carences en oligo-éléments chez les ruminants en France. III. - Éléments d'enquête obtenus par les analyses de fourrages. *Annales de Recherches Vétérinaires*. 1973. Vol. 4, n° 4, pp. 565-598.

BELLANGER, J. R., TRESSOL, J. C. et PIEL, H. P., 1979. A semi-automated method for the determination of iodine in plants. *Annales De Recherches Veterinaires. Annals of Veterinary Research*. 1979. Vol. 10, n° 1, pp. 113-118.

BRADLEY, C. H., 1993. Copper poisoning in a dairy herd fed a mineral supplement. *The Canadian Veterinary Journal = La Revue Veterinaire Canadienne*. mai 1993. Vol. 34, n° 5, pp. 287-292.

BRULLE, Laurent, 2008. *Diagnostic des carences en oligo-éléments chez les bovins*. Thèse de doctorat vétérinaire. Lyon : Ecole nationale vétérinaire de Lyon.

CASTRO, S. I. Borucki, LACASSE, P., FOUQUET, A., BERARDIN, F., ROBICHAUD, A. et BERTHIAUME, R., 2011. Short communication: Feed iodine concentrations on farms with

contrasting levels of iodine in milk. *Journal of Dairy Science*. septembre 2011. Vol. 94, n° 9, pp. 4684-4689. DOI 10.3168/jds.2010-3714.

CEBALLOS, A., SÁNCHEZ, J., STRYHN, H., MONTGOMERY, J. B., BARKEMA, H. W. et WICHTEL, J. J., 2009. Meta-analysis of the effect of oral selenium supplementation on milk selenium concentration in cattle. *Journal of Dairy Science*. 1 janvier 2009. Vol. 92, n° 1, pp. 324-342. DOI 10.3168/jds.2008-1545.

CHANTREAU, Jérôme et AMIOT, Jocelyn, 2021. Alimentation en élevage allaitant : les points clés autour du vêlage pour accompagner l'éleveur. *Bulletin des GTV*. 2021. N° 102, pp. 45-52.

CHORFI, Younes, 2013. Utilisation du profil métabolique dans l'évaluation de l'état nutritionnel chez le bovin laitier. *Le Point Vétérinaire expert rural n° spécial - Prévention nutritionnelle en élevage bovin*. 2013. Vol. 44, pp. 156-163.

CHRISTODOULOPOULOS, G., ROUBIES, N., KARATZIAS, H. et PAPASTERIADIS, A., 2003. Selenium concentration in blood and hair of holstein dairy cows. *Biological Trace Element Research*. février 2003. Vol. 91, n° 2, pp. 145-150. DOI 10.1385/BTER:91:2:145.

CNRTL, 2012. Définition de SÉLÉNIFÈRE. [en ligne]. 2012. [Consulté le 15 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.cnrtl.fr/definition/s%C3%A9l%C3%A9nif%C3%A8re>.

CODE RURAL ET DE LA PÊCHE MARITIME, 2021. *Article L1* [en ligne]. 25 août 2021. [Consulté le 16 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043978760.

COÏC, Yves et COPPENET, Marcel, 1989. *Les Oligo-éléments en Agriculture Et élevage: Incidence Sur la Nutrition Humaine*. Paris : Quae. ISBN 978-2-7380-0138-2.

COMBS, D. K., 1987. Hair analysis as an indicator of mineral status of livestock. *Journal of Animal Science*. décembre 1987. Vol. 65, n° 6, pp. 1753-1758. DOI 10.2527/jas1987.6561753x.

CORAH, L. R. et IVES, S., 1991. The effects of essential trace minerals on reproduction in beef cattle. *The Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice*. mars 1991. Vol. 7, n° 1, pp. 41-57. DOI 10.1016/s0749-0720(15)30809-4.

COUNOTTE, G. H. et HARTMANS, J., 1989. Relation between selenium content and glutathione-peroxidase activity in blood of cattle. *The Veterinary Quarterly*. juillet 1989. Vol. 11, n° 3, pp. 155-160. DOI 10.1080/01652176.1989.9694214.

CUNNINGHAM, Ira James, 1931. Some biochemical and physiological aspects of copper in animal nutrition. *Biochemical Journal*. 1931. Vol. 25, n° 4, pp. 1267-1294.

DARCH, Tegan, MCGRATH, Steve P., LEE, Michael R. F., BEAUMONT, Deborah A., BLACKWELL, Martin S. A., HORROCKS, Claire A., EVANS, Jessica et STORKEY, Jonathan, 2020. The Mineral Composition of Wild-Type and Cultivated Varieties of Pasture Species. *Agronomy*. octobre 2020. Vol. 10, n° 10, pp. 1463. DOI 10.3390/agronomy10101463.

DE MARIA, Carmela Ghionna et ANGELUCCI, M., 1978. TRACE ELEMENT CONTENT IN COLOSTRUM OF DIFFERENT RUMINANT SPECIES AT VARIOUS POST-PARTUM INTERVALS. *Annales de Recherches Vétérinaires*. 1978. Vol. 9, n° 2, pp. 277-280.

DEJOU, Jean, MONTARD, François-Xavier, LAMAND, Michel, BELLANGER, Jacques, BAUCHER, Georges, JOURDAN, Olivier et PONS, Bernard, 1985. Effets de l'application de cuivre et de zinc en sol volcanique sur les teneurs du sol et d'un ray-grass anglais en ces deux oligo-éléments. *Agronomie*. 1985. Vol. 5, n° 9, pp. 841-850.

DELAGARDE, R, PRACHE, S, D'HOOR, P et PETIT, M, 2001. Ingestion de l'herbe par les ruminants au pâturage. *Fourrages*. 2001. N° 166.

DEMARQUILLY, C, DULPHY, J.P et ANDRIEU, J.P, 1998. Valeurs nutritive et alimentaire des fourrages selon les techniques de conservation : foin, ensilage, enrubannage. *Fourrages*. 1998. N° 155.

DONALD, G. E., LANGLANDS, J. P., BOWLES, J. E. et SMITH, A. J., 1994. Subclinical selenium insufficiency. 6. Thermoregulatory ability of perinatal lambs born to ewes supplemented with selenium and iodine. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 1994. Vol. 34, n° 1, pp. 19-24. DOI 10.1071/ea9940019.

DREAL PACA, 2010. *Suivi scientifique d'espèces animales - Note méthodologique*. juin 2010.

DUFTY, J. H., BINGLEY, J. B. et COVE, L. Y., 1977. The plasma zinc concentration of nonpregnant, pregnant and parturient Hereford cattle. *Australian Veterinary Journal*. novembre 1977. Vol. 53, n° 11, pp. 519-522. DOI 10.1111/j.1751-0813.1977.tb07935.x.

DUMON, Henri, 2007. Oligo-éléments : comment interpréter les recommandations chez les animaux de rente ? *Bulletin des GTV*. 2007. N° 38, pp. 17-20.

ENJALBERT, F., 1991. Computer ration calculation for ruminants. Software LARELEV. *Revue de Médecine Vétérinaire (France)* [en ligne]. 1991. [Consulté le 10 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Computer+ration+calculation+for+ruminants.+Software+LARELEV&author=Enjalbert%2C+F.+%28Ecole+Nationale+Vétérinaire+de+Toulouse+%28France%29.+Service+d%27Alimentation%29&publication_year=1991.

ENJALBERT, F, 2009a. Objectifs nutritionnels péripartum et transferts des micro-nutriments. In : *Journées nationales GTV*. Nantes. 2009. pp. 215-220.

ENJALBERT, F, 2009b. The relationship between trace elements status and health in calves. *Revue Méd. Vét.* 2009. pp. 7.

ENJALBERT, F., ALVES DE OLIVEIRA, Laurent et LEBRETON, Pascal, 2009. Statut en oligo-éléments : état des lieux et évolution. *Le Point Vétérinaire*. 2009. N° 292, pp. 35-38.

ENJALBERT, F., LEBRETON, P. et SALAT, O., 2006. Effects 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*. décembre 2006. Vol. 90, n° 11-12, pp. 459-466. DOI 10.1111/j.1439-0396.2006.00627.x.

ENJALBERT, F., LEBRETON, P., SALAT, O., MESCHY, F. et SCHELCHER, F., 2002. Effects of copper supplementation on the copper status of peripartum beef cows and their calves. *The Veterinary Record*. 13 juillet 2002. Vol. 151, n° 2, pp. 50-53. DOI 10.1136/vr.151.2.50.

ENJALBERT, F., LEBRETON, P., SALAT, O. et SCHELCHER, F., 1999. Effects of pre- or postpartum selenium supplementation on selenium status in beef cows and their calves. *Journal of Animal Science*. janvier 1999. Vol. 77, n° 1, pp. 223-229. DOI 10.2527/1999.771223x.

ENSLEY, Steve, 2020. Evaluating Mineral Status in Ruminant Livestock. *The Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice*. novembre 2020. Vol. 36, n° 3, pp. 525-546. DOI 10.1016/j.cvfa.2020.08.009.

FAGERIA, N. K., BALIGAR, V. C. et CLARK, R. B., 2002. Micronutrients in Crop Production. In : SPARKS, Donald L. (éd.), *Advances in Agronomy* [en ligne]. Academic Press. pp. 185-268. *Advances in Agronomy*. [Consulté le 9 avril 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211302770156>.

FLACHOWSKY, Gerhard, FRANKE, Katrin, MEYER, Ulrich, LEITERER, Matthias et SCHÖNE, Friedrich, 2014. Influencing factors on iodine content of cow milk. *European Journal of Nutrition*. 2014. Vol. 53, n° 2, pp. 351-365. DOI 10.1007/s00394-013-0597-4.

FRANCOZ, David et COUTURE, Yvon, 2014. *Manuel de médecine des bovins*. Paris : Éditions Med'com.

FRANCOZ, David, NICHOLS, Sylvain et SCHELCHER, François, 2017. *Guide pratique des maladies du veau*. Editions Med'com. Paris : Editions Med'com. ISBN 978-2-35403-243-2.

GABRYSZUK, Mirosław, SLONIEWSKI, Krzysztof et SAKOWSKI, Tomasz, 2008. Macro- and microelements in milk and hair of cows from conventional vs. organic farms. *Animal Science Papers and Reports*. 1 janvier 2008. Vol. 26, pp. 199-209.

GAILLARD, Céline, 2019. Estimer les apports et ajuster la complémentation minérale des bovins au pâturage. *Le Point Vétérinaire*. décembre 2019. N° 401, pp. 61-64.

GENOT, Valérie, COLINET, Gilles, BRAHY, V. et BOCK, L., 2009. L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4 - sol 1 de « L'État de l'Environnement Wallon 2006–2007 »). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*. 1 janvier 2009. Vol. 13.

Géoportail, 2022. [en ligne]. [Consulté le 10 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.geoportail.gouv.fr/>.

GILLES, Aurélie, LEBRETON, Pascal et TROEGELER, Annabelle, 2009. Effets d'une supplémentation en iode et sélénium de la vache gestante sur les statuts en oligo-éléments et immunitaire du veau nouveau-né. *Revue Méd. Vét.* 2009. Vol. 106, pp. 10-17.

GOFF, Jesse P et STABEL, Judith R, 1990. Decreased Plasma Retinol, a-Tocopherol, and Zinc Concentration During the Periparturient Period: Effect of Milk Fever. . 1990. Vol. 73, n° 11, pp. 5.

GOONERATNE, S. R. et CHRISTENSEN, D. A., 1989. A SURVEY OF MATERNAL COPPER STATUS AND FETAL TISSUE COPPER CONCENTRATIONS IN SASKATCHEWAN BOVINE. *Canadian Journal of Animal Science*. 1 mars 1989. Vol. 69, n° 1, pp. 141-150. DOI 10.4141/cjas89-017.

GOONERATNE, S. R. et CHRISTENSEN, D. A., 1989. A survey of maternal and fetal tissue zinc, iron, manganese and selenium concentrations in bovine. *Canadian Journal of Animal Science*. mars 1989. Vol. 69, n° 1, pp. 151-159. DOI 10.4141/cjas89-018.

GROUPE SALERS EVOLUTION, 2000. Le standard de la race Salers. *Groupe Salers Evolution* [en ligne]. 2000. [Consulté le 11 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.salers.org/fr/la-race-salers/caracteristiques>.

GUATTEO, Raphaël, DOUART, Alain et FORTINEAU, Olivier, 2013. Alimentation et santé du pied des bovins. *Le Point Vétérinaire expert rural n° spécial - Prévention nutritionnelle en élevage bovin*. 2013. pp. 78-84.

GUYOT, Hugues, 2013. Rôle des oligo-éléments dans la santé du veau. *Le Point Vétérinaire expert rural n° spécial - Prévention nutritionnelle en élevage bovin*. 2013. Vol. 44, pp. 24-30.

GUYOT, Hugues, ALIAOUI, Hamani et ROLLIN, Frédéric, 2004. Trace elements deficiencies in the pathogenesis of respiratory distress syndrome in the mature newborn calf. In : *XXIII World Buiatrics Congress* [en ligne]. 2004. [Consulté le 29 juin 2022]. Disponible à l'adresse : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/76009>.

GUYOT, Hugues et ROLLIN, Frédéric, 2007. Le diagnostic des carences en sélénium et iode chez les bovins. *Ann. Méd. Vét.* 2007. N° 151, pp. 166-191.

GUYOT, Hugues, SAEGERMAN, Claude, LEBRETON, Pascal, SANDERSEN, Charlotte et ROLLIN, Frédéric, 2009. Epidemiology of trace elements deficiencies in Belgian beef and dairy cattle herds. *Journal of trace elements in medicine and biology: organ of the Society for Minerals and Trace Elements (GMS)*. 2009. Vol. 23, n° 2, pp. 116-123. DOI 10.1016/j.jtemb.2009.02.006.

HALL, Jeffery O, 2005. Appropriate Methods of Diagnosing Mineral Deficiencies. In : *Mid-South Ruminant Nutrition Conference*. 2005. pp. 6.

HARRISON, J. H., HANCOCK, D. D. et CONRAD, H. R., 1984. Vitamin E and selenium for reproduction of the dairy cow. *Journal of Dairy Science*. janvier 1984. Vol. 67, n° 1, pp. 123-132. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(84)81275-8.

HARVEY, Kelsey Margaret, COOKE, Reinaldo Fernandes et MARQUES, Rodrigo da Silva, 2021. Supplementing Trace Minerals to Beef Cows during Gestation to Enhance Productive and Health Responses of the Offspring. *Animals : an Open Access Journal from MDPI*. 18 avril 2021. Vol. 11, n° 4, pp. 1159. DOI 10.3390/ani11041159.

HE, Zhenli L., YANG, Xiaoe E. et STOFFELLA, Peter J., 2005. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2005. Vol. 19, n° 2, pp. 125-140. DOI 10.1016/j.jtemb.2005.02.010.

HERDT, Thomas H. et HOFF, Brent, 2011. The use of blood analysis to evaluate trace mineral status in ruminant livestock. *The Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice*. 2011. Vol. 27, n° 2, pp. 255-283, vii. DOI 10.1016/j.cvfa.2011.02.004.

HERNANDEZ, M. V., ETTA, K. M., REINEKE, E. P., OXENDER, W. D. et HAFS, H. D., 1972. Thyroid function in the prenatal and neonatal bovine. *Journal of Animal Science*. mai 1972. Vol. 34, n° 5, pp. 780-785. DOI 10.2527/jas1972.345780x.

HEROLD, Andrea, MÜLLER, Anja-Elvira, STAUFENBIEL, Rudolf et PIEPER, Laura, 2020. [Bovine trace mineral concentrations in different sample media with emphasis on fecal analysis]. *Tierärztliche Praxis. Ausgabe G, Grosstiere/Nutztiere*. février 2020. Vol. 48, n° 1, pp. 5-14. DOI 10.1055/a-1067-3585.

HIDIROGLOU, M., 1979. Trace Element Deficiencies and Fertility in Ruminants: A Review. *Journal of Dairy Science*. 1 août 1979. Vol. 62, n° 8, pp. 1195-1206. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(79)83400-1.

HIDIROGLOU, M., 1980. Trace elements in the fetal and neonate ruminant: a review. *The Canadian Veterinary Journal = La Revue Veterinaire Canadienne*. décembre 1980. Vol. 21, n° 12, pp. 328-335.

HIDIROGLOU, M. et KNIPFEL, J. E., 1981. Maternal-fetal relationships of copper, manganese, and sulfur in ruminants. A review. *Journal of Dairy Science*. août 1981. Vol. 64, n° 8, pp. 1637-1647. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(81)82741-5.

HOSTETLER, Chris E., KINCAID, Ron L. et MIRANDO, Mark A., 2003. The role of essential trace elements in embryonic and fetal development in livestock. *The Veterinary Journal*. 1 septembre 2003. Vol. 166, n° 2, pp. 125-139. DOI 10.1016/S1090-0233(02)00310-6.

INRA, 1988. *Tables de l'alimentation des bovins, ovins et caprins*. ISBN 2-7380-0072-X.

INRA, 2018. *Alimentation des Ruminants*. Editions Quae. Versailles, France. ISBN 978-2-7592-2867-6.

INRAE, 2019. INRAtion. [en ligne]. 2019. [Consulté le 15 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.inration.fr/>.

INSTITUT DE L'ÉLEVAGE, 2018. *Herbe et fourrages : un immense champ des possibles* [en ligne]. [Consulté le 22 juin 2022]. Magazine de l'Institut de l'élevage. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/f0f5a9c1-0a5b-46d4-b019-dc45f06b40c6.

JENSEN, Hayley, ORTH, Barbara, REISER, Rene, BÜRGE, Diane, LEHTO, Niklas J., ALMOND, Peter, GAW, Sally, THOMSON, Barbara, LILBURNE, Linda et ROBINSON, Brett, 2019. Environmental Parameters Affecting the Concentration of Iodine in New Zealand Pasture. *Journal of Environmental Quality*. 2019. Vol. 48, n° 5, pp. 1517-1523. DOI 10.2134/jeq2019.03.0128.

JONDREVILLE, Catherine, REVY, P.S., JAFFRÉZIC, Anne et DOURMAD, Jean-Yves, 2002. Le cuivre dans l'alimentation du porc : oligoélément essentiel, facteur de croissance et risque potentiel pour l'homme et l'environnement. *Productions animales*. 2002. Vol. 15, n° 4, pp. 247-265.

KAO, P. T., DARCH, T., MCGRATH, S. P., KENDALL, N. R., BUSS, H. L., WARREN, H. et LEE, M. R. F., 2020. Chapter Four - Factors influencing elemental micronutrient supply from pasture systems for grazing ruminants. In : SPARKS, Donald L. (éd.), *Advances in Agronomy* [en ligne].

Academic Press. pp. 161-229. [Consulté le 10 mai 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211320300675>.

KERGUELEN, M, 1962. Valeur minérale de l'herbe (en oligoéléments). Influence du sol et de la fumure sur la composition minérale. *Fourrages*. 1962. N° 10, pp. 63-71.

KNOWLES, S. O., GRACE, N. D., WURMS, K. et LEE, J., 1999. Significance of amount and form of dietary selenium on blood, milk, and casein selenium concentrations in grazing cows. *Journal of Dairy Science*. février 1999. Vol. 82, n° 2, pp. 429-437. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(99)75249-5.

KOLLER, L. D., WHITBECK, G. A. et SOUTH, P. J., 1984. Transplacental transfer and colostrum concentrations of selenium in beef cattle. *American Journal of Veterinary Research*. 1984. Vol. 45, n° 12, pp. 2507-2510.

KUME, Shin-Ichi et TANABE, Shinobu, 1993. Effect of Parity on Colostral Mineral Concentrations of Holstein Cows and Value of Colostrum as a Mineral Source for Newborn Calves. *Journal of Dairy Science*. juin 1993. Vol. 76, n° 6, pp. 1654-1660. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(93)77499-8.

LAMAND, M., 1969. Dosage du sélénium dans les produits biologiques et mélanges minéraux alimentaires. *Ann. Fals. Expert. chim.* 1969. pp. 4-1.

LAMAND, M, 1970. Carences en oligo-éléments chez les ruminants. *Cahiers Méd. vét.* 1970. Vol. 60.

LAMAND, M., 1976. *Les oligo-éléments*. Paris : Dalloz.

LAMAND, M., 1989. Influence of molybdenum and sulfur on copper metabolism in sheep: comparison of elemental sulfur and sulfate. *Annales De Recherches Veterinaires. Annals of Veterinary Research*. 1989. Vol. 20, n° 1, pp. 103-106.

LAMAND, M., AMBOULOU, D. et RAYSSIGUIER, Y., 1977. Effect of quality of forage on availability of trace elements and some major elements. *Annales De Recherches Veterinaires. Annals of Veterinary Research*. 1977. Vol. 8, n° 3, pp. 303-306.

LAMAND, M., LAB, C., MIGNON, M. et TRESSOL, J.C., 1983. A ZINC-DEFICIENT DIET FOR RUMINANTS: DIAGNOSIS AND TREATMENT OF DEFICIENCY. *Annales de Recherches Vétérinaires*. 1983. Vol. 14, n° 3, pp. 211-215.

LAMAND, M., LAB, Claudine, LAFARGE, C. et MONTEL, G., 1979. Influence of silage contamination by soil upon trace elements availability in sheep. *Annales de Recherches Vétérinaires*. 1979. Vol. 10, n° 4, pp. 571-573.

LAMAND, M. et LEVIEUX, D., 1981. Effects of infection on plasma levels of copper and zinc in ewes. *Annales De Recherches Veterinaires. Annals of Veterinary Research*. 1981. Vol. 12, n° 2, pp. 133-136.

LAMAND, M. et TRESSOL, J. C., 1992. Contribution of milk to iodine intake in France. *Biological Trace Element Research*. mars 1992. Vol. 32, pp. 245-251. DOI 10.1007/BF02784607.

LAMAND, Michel, 1991. Les oligo-éléments en médecine vétérinaire. In : *Les oligo-éléments en médecine et biologie*. Tec&doc. Paris : Lavoissier. pp. 77-104. ISBN 2-85206-714-5.

LAMAND, Michel et PÉRIGAUD, Simone, 1973. Carences en oligo-éléments chez les ruminants en France. I. -Éléments d'enquête obtenus dans la pratique vétérinaire. *Annales de Recherches Vétérinaires*. 1973. Vol. 4, n° 4, pp. 513-534.

LARRÁN, Belén, MIRANDA, Marta, HERRERO-LATORRE, Carlos, RIGUEIRA, Lucas, PEREIRA, Víctor, SUÁREZ, María Luisa et LÓPEZ-ALONSO, Marta, 2021. Influence of Haemolysis on the Mineral Profile of Cattle Serum. *Animals: an open access journal from MDPI*. 2021. Vol. 11, n° 12, pp. 3336. DOI 10.3390/ani11123336.

LARSEN, Jwa, VIZARD, Al et ANDERSON, N., 1995. Production losses in Merino ewes and financial penalties caused by trichostrongylid infections during winter and spring. *Australian Veterinary Journal*. 1995. Vol. 72, n° 2, pp. 58-63. DOI 10.1111/j.1751-0813.1995.tb15332.x.

LARSON, L. L., OWEN, F. G., ALBRIGHT, J. L., APPLEMAN, R. D., LAMB, R. C. et MULLER, L. D., 1977. Guidelines Toward More Uniformity in Measuring and Reporting Calf Experimental Data. *Journal of Dairy Science*. 1 juin 1977. Vol. 60, n° 6, pp. 989-991. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(77)83975-1.

LENSINK, Bernardus Johan et LERUSTE, Hélène, 2006. *L'observation du troupeau bovin: voir, interpréter, agir*. Paris : France agricole. Produire mieux. ISBN 978-2-85557-128-7. 636.2 LEN.

LEQUEUX, G, 2016. Santé et performances chez les bovins : rôles des oligo-éléments. In : *Journées nationales GTV*. Nantes. 2016. pp. 221-226.

LEQUEUX, Guillaume, 2017. Diagnostic des carences en oligo-éléments en élevage bovin. *Le Point Vétérinaire expert rural n° spécial - Les indispensables en pratique rurale*. 2017. pp. 64-68.

LEQUEUX, Guillaume et CESBRON, Nora, 2020. Apport des profils oligo-éléments dans le diagnostic des carences en élevage bovin. *Bulletin des GTV*. 2020. N° 100, pp. 47-55.

LIBERA, Kacper, KONIECZNY, Kacper, WITKOWSKA, Katarzyna, ŻUREK, Katarzyna, SZUMACHER-STRABEL, Małgorzata, CIESLAK, Adam et SMULSKI, Sebastian, 2021. The Association between Selected Dietary Minerals and Mastitis in Dairy Cows-A Review. *Animals: an open access journal from MDPI*. 7 août 2021. Vol. 11, n° 8, pp. 2330. DOI 10.3390/ani11082330.

L'observatoire des oligo-éléments dans les terres agricoles, 2019. *Vétalis* [en ligne]. [Consulté le 20 août 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.vetalis.fr/observatoire-des-oligo-elements/>.

LOPREIATO, Vincenzo, MEZZETTI, Matteo, CATTANEO, Luca, FERRONATO, Giulia, MINUTI, Andrea et TREVISI, Erminio, 2020. Role of nutraceuticals during the transition period of dairy cows: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 27 août 2020. Vol. 11, pp. 96. DOI 10.1186/s40104-020-00501-x.

LUMET, Lionel et NEGRIOLLI, Jérôme, 2007. Dosage des oligo-éléments dans le sang par torche à plasma couplée à la spectrométrie de masse. *Bulletin des GTV*. 2007. N° 38, pp. 27-30.

LUNA, Diego, LÓPEZ-ALONSO, Marta, CEDEÑO, Yolanda, RIGUEIRA, Lucas, PEREIRA, Víctor et MIRANDA, Marta, 2019. Determination of Essential and Toxic Elements in Cattle Blood: Serum vs Plasma. *Animals: an open access journal from MDPI*. 2019. Vol. 9, n° 7, pp. E465. DOI 10.3390/ani9070465.

MAILLARD, Renaud et GUIN, Bertrand, 2017. Transfert d'immunité colostrale : l'essentiel. *Le Point Vétérinaire expert rural n° spécial - Les indispensables en pratique rurale*. 2017. pp. 146-149.

MARQUES, R. S., COOKE, R. F., RODRIGUES, M. C., CAPPELLOZZA, B. I., MILLS, R. R., LARSON, C. K., MORIEL, P. et BOHNERT, D. W., 2016. Effects of organic or inorganic cobalt, copper, manganese, and zinc supplementation to late-gestating beef cows on productive and physiological responses of the offspring. *Journal of Animal Science*. mars 2016. Vol. 94, n° 3, pp. 1215-1226. DOI 10.2527/jas.2015-0036.

MARTIN, Mickaël, 2007. Le transfert des oligo-éléments du sol à l'animal. *Bulletin des GTV*. 2007. N° 38, pp. 21-26.

MCCOY, M. A., SMYTH, J. A., ELLIS, W. A., ARTHUR, J. R. et KENNEDY, D. G., 1997. Experimental reproduction of iodine deficiency in cattle. *The Veterinary Record*. 22 novembre 1997. Vol. 141, n° 21, pp. 544-547. DOI 10.1136/vr.141.21.544.

MCDONALD, P, EDWARDS, R A, GREENHALGH, J F D, MORGAN, C A, SINCLAIR, L A et WILKINSON, R G, 2011. *Animal nutrition*. Seventh edition. ISBN 978-1-4082-0423-8.

MEGLIA, Guillermo, JOHANNISSON, Anders, PETERSSON, L et WALLER, Karin, 2001. Changes in some Blood Micronutrients, Leukocytes and Neutrophil Expression of Adhesion Molecules in Periparturient Dairy Cows. *Acta veterinaria Scandinavica*. 1 février 2001. Vol. 42, pp. 139-50. DOI 10.1186/1751-0147-42-139.

MENCH, Michel, 1991. Prélèvements des métaux dans le sol et transfert dans les fourrages. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. 1991. Vol. 77, n° 8, pp. 87.

MESCHY, François, 2007. Alimentation minérale et vitaminique des ruminants : actualisation des connaissances. *Productions animales*. 2007. Vol. 20, n° 2, pp. 119-128.

MESCHY, François, 2017. *La nutrition minérale des ruminants*. Editions Quae. Versailles, France. ISBN 978-2-7592-2749-5.

MEZZETTI, Matteo, BIONAZ, Massimo et TREVISI, Erminio, 2020. Interaction between inflammation and metabolism in periparturient dairy cows. *Journal of Animal Science*. 18 août 2020. Vol. 98, n° Suppl 1, pp. S155-S174. DOI 10.1093/jas/skaa134.

MILLER, G. Y., BARTLETT, P. C., ERSKINE, R. J. et SMITH, K. L., 1995. Factors affecting serum selenium and vitamin E concentrations in dairy cows. *Journal of the American Veterinary Medical Association*. 1 mai 1995. Vol. 206, n° 9, pp. 1369-1373.

MILLER, J. K. et MILLER, W. J., 1962. Experimental Zinc Deficiency and Recovery of Calves. *The Journal of Nutrition*. 1 avril 1962. Vol. 76, n° 4, pp. 467-474. DOI 10.1093/jn/76.4.467.

MILLER, J. K., SWANSON, E. W., ASCHBACHER, P. W. et CRAGLE, R. G., 1967. Iodine transfer and concentration in the prepartum cow, fetus, and neonatal calf. *Journal of Dairy Science*. août 1967. Vol. 50, n° 8, pp. 1301-1305. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(67)87617-3.

MILLER, J. K., SWANSON, E. W. et SPALDING, G. E., 1975. Iodine absorption, excretion, recycling, and tissue distribution in the dairy cow. *Journal of Dairy Science*. octobre 1975. Vol. 58, n° 10, pp. 1578-1593. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(75)84753-9.

MILLER, W. J., CLIFTON, C. M., FOWLER, P. R. et PERKINS, H. F., 1965. Influence of High Levels of Dietary Zinc on Zinc in Milk, Performance and Biochemistry of Lactating Cows¹. *Journal of Dairy Science*. 1 avril 1965. Vol. 48, n° 4, pp. 450-453. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(65)88251-0.

MILLER, W.J., 1970. Zinc Nutrition of Cattle: A Review. *Journal of Dairy Science*. août 1970. Vol. 53, n° 8, pp. 1123-1135. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(70)86355-X.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2013. Qu'est-ce que l'agroécologie ? *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. 2013. [Consulté le 16 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-lagroecologie>.

MOLMY, Mathilde, 2018. *Marqueurs d'inflammation chez les bovins: corrélation chez les mêmes animaux entre les données cliniques et l'examen post-mortem*. Thèse de doctorat vétérinaire. Toulouse : Ecole nationale vétérinaire de Toulouse.

MORGAN, PI, GRACE, Nd et LILLEY, Dp, 2014. Using sodium molybdate to treat chronic copper toxicity in dairy cows: A practical approach. *New Zealand Veterinary Journal*. mai 2014. Vol. 62, n° 3, pp. 167-170. DOI 10.1080/00480169.2013.862150.

MUEHLENBEIN, E, BRINK, Dennis, DEUTSCHER, G, CARLSON, M et JOHNSON, A, 2001. Effects of inorganic and organic copper supplemented to first-calf cows on cow reproduction and calf health and performance. *Journal of animal science*. 1 août 2001. Vol. 79, pp. 1650-9. DOI 10.2527/2001.7971650x.

NEIRINCK, Karin et POULIQUEN, Hervé, 2007. Toxicité des oligo-éléments chez les animaux de production. *Bulletin des GTV*. 2007. N° 38, pp. 65-68.

NOUGUES, Claudie et LAMAND, M., 1972. POSSIBILITÉS ET LIMITES DE L'UTILISATION DU POIL DANS LE DIAGNOSTIC DE LA CARENCE EN ZINC CHEZ LE BOVIN. *Annales de Recherches Vétérinaires*. 1972. Vol. 3, n° 3, pp. 505-509.

NRC, 1996. *Nutrient Requirements of Beef Cattle* [en ligne]. 7th edition. Washington DC : National Academy Press eds. [Consulté le 22 avril 2022]. Disponible à l'adresse : <https://nap.nationalacademies.org/catalog/9791/nutrient-requirements-of-beef-cattle-seventh-revised-edition-update-2000>.

NRC, 2001. *Nutrient requirements of Dairy Cattle*. 7th edition. Washington DC : National Academy Press eds. ISBN 978-0-309-38815-3.

OCTAVET, 2022. *Fiches de demande d'analyses des fourrages et des aliments pour les ruminants* [en ligne]. 2022. [Consulté le 4 juillet 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.octavet.com/image/data/journal2/order-pdfs/ANA_Fourrages&AlimentsRuminants_2022.pdf.

OLIVARES, Roberto Walter Israel, POSTMA, Gabriela Cintia, SCHAPIRA, Andrea, IGLESIAS, Dario Ezequiel, VALDEZ, Laura Beatriz, BREININGER, Elizabeth, GAZZANEO, Pablo Daniel et MINATEL, Leonardo, 2019. Biochemical and Morphological Alterations in Hearts of Copper-

Deficient Bovines. *Biological Trace Element Research*. juin 2019. Vol. 189, n° 2, pp. 447-455. DOI 10.1007/s12011-018-1476-x.

ORTMAN, K. et PEHRSON, B., 1997. Selenite and selenium yeast as feed supplements for dairy cows. *Zentralblatt Fur Veterinarmedizin. Reihe A*. août 1997. Vol. 44, n° 6, pp. 373-380. DOI 10.1111/j.1439-0442.1997.tb01121.x.

ORTMAN, K. et PEHRSON, B., 1999. Effect of selenate as a feed supplement to dairy cows in comparison to selenite and selenium yeast. *Journal of Animal Science*. décembre 1999. Vol. 77, n° 12, pp. 3365-3370. DOI 10.2527/1999.77123365x.

O.S. RACE AUBRAC, 2022. 10 bonnes raisons d'élever des Aubrac. *OS RACE AUBRAC* [en ligne]. 2022. [Consulté le 11 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://race-aubrac.com/la-race-aubrac/10-bonnes-raisons/>.

OSORIO, J. S., TREVISI, E., LI, C., DRACKLEY, J. K., SOCHA, M. T. et LOOR, J. J., 2016. Supplementing Zn, Mn, and Cu from amino acid complexes and Co from cobalt glucoheptonate during the periparturient period benefits postparturient cow performance and blood neutrophil function. *Journal of Dairy Science*. mars 2016. Vol. 99, n° 3, pp. 1868-1883. DOI 10.3168/jds.2015-10040.

PAGLIA, D. E. et VALENTINE, W. N., 1967. Studies on the quantitative and qualitative characterization of erythrocyte glutathione peroxidase. *The Journal of Laboratory and Clinical Medicine*. juillet 1967. Vol. 70, n° 1, pp. 158-169.

PASQUIER, Lucie, 2016. *Guide du sol* [en ligne]. 2016. ENESAD - Unité informatique Pédagogique. [Consulté le 31 mai 2022]. Disponible à l'adresse : <http://www.vertcarbone.fr/wp-content/uploads/2018/03/Guide-du-sol-Lamotte.pdf>.

PAVLATA, Leos, PRÁ, J., PODHORSK, A., PECHOVA, Alena et HALOUN, T., 2003. Selenium Metabolism in Cattle: Maternal Transfer of Selenium to Newborn Calves at Different Selenium Concentrations in Dams. *Acta Veterinaria Brno*. 3 décembre 2003. Vol. 72, pp. 639-646. DOI 10.2754/avb200372040639.

PÉRIGAUD, Simone, 1974. Oligo-éléments et qualité des fourrages : influence de la fumure minérale. *Fourrages*. 1974. Vol. 57, pp. 43-60.

PÉRIGAUD, Simone, 1975. Influence de la fertilisation sur la composition minérale des fourrages, conséquences zootechniques. *Fourrages*. 1975. Vol. 63, pp. 107-125.

PÉRIGAUD, Simone, BELLANGER, J et LAMAND, M, 1972. Les oligo-éléments dans les foin en France. *Fourrages*. 1972. Vol. 52, pp. 11-37.

PÉRIGAUD, Simone et LAMAND, M., 1973. Carences en oligo-éléments chez les ruminants en France. II. - Eléments d'enquête obtenus dans les élevages. *Annales de Recherches Vétérinaires*. 1973. Vol. 4, n° 4, pp. 535-563.

PETIT, M. et AGABRIEL, J., 1993. Etat corporel des vaches allaitantes Charolaises : signification, utilisation pratique et relations avec la reproduction. *INRAE Productions Animales*. 10 décembre 1993. Vol. 6, n° 5, pp. 311-318. DOI 10.20870/productions-animales.1993.6.5.4212.

PIEL, H-P, 1978. La teneur en iode de foins de prairie permanente de première coupe récoltés en France. *Bulletin Technique C.R.Z.V - Theix INRA*. 1978. N° 34, pp. 5-10.

PIN, Marcel, 2007. Métabolisme des oligo-éléments chez les ruminants. *Bulletin des GTV*. février 2007. N° 38, pp. 31-35.

PODOLL, K, BERNARD, Joni, ULLREY, D, DEBAR, S, KU, Pao et MAGEE, W, 1992. Dietary selenate versus selenite for cattle, sheep, and horses. *Journal of animal science*. 1 juillet 1992. Vol. 70, pp. 1965-70. DOI 10.2527/1992.7061965x.

PRYOR, W. J., 1964. The distribution of copper in bovine and ovine foetuses, with reference to their age and maternal liver copper concentrations. *Research in Veterinary Science*. 1964. Vol. 5, pp. 123-137.

PRYOR, W.J., 1976. Plasma zinc status of dairy cattle in the periparturient period. *New Zealand Veterinary Journal*. 1 avril 1976. Vol. 24, n° 4, pp. 57-58. DOI 10.1080/00480169.1976.34283.

PULS, Robert, 1988. *Mineral levels in animal health - Diagnostic data*. Canada : Sherpa international.

R CORE TEAM, 2022. *R : A language and environment for statistical computing*. [en ligne]. 2022. Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing. [Consulté le 12 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.r-project.org/>.

RANCHES, J., VENDRAMINI, J. M. B. et ARTHINGTON, J. D., 2017. Effects of selenium biofortification of hayfields on measures of selenium status in cows and calves consuming these forages¹. *Journal of Animal Science*. 1 janvier 2017. Vol. 95, n° 1, pp. 120-128. DOI 10.2527/jas.2016.0943.

RAVARY-PLUMIOËN, 1971-..., Béragère, 2016. *Mémento de médecine bovine*. 3e éd. Paris : Éditions Med'com. ISBN 978-2-35403-237-1.

Règlement (CE) n° 1459/2005 de la Commission du 8 septembre 2005 modifiant les conditions d'autorisation de plusieurs additifs pour aliments des animaux appartenant au groupe des oligoéléments., 2005. . Journal Officiel de l'Union Européenne.

Règlement (CE) n° 1831/2003 du parlement européen et du conseil du 22 septembre 2003 relatif aux additifs destinés à l'alimentation des animaux., 2003. . Journal Officiel L 268.

REID, R. L. et HORVATH, D. J., 1980. Soil chemistry and mineral problems in farm livestock. A review. *Animal Feed Science and Technology*. 1 juin 1980. Vol. 5, n° 2, pp. 95-167. DOI 10.1016/0377-8401(80)90002-4.

ROLLIN, Frédéric, 2002. Mise en évidence des carences en oligo-éléments dans les exploitations bovines. In : *Proceedings of the veterinary Sciences Congress*. SPCV, Oeiras. octobre 2002. pp. 95-106.

ROLLIN, Frederic et GUYOT, Hugues, 2003. APPROCHE PRATIQUE ET INTÉGRÉE D'UN TROUPEAU AVEC PATHOLOGIES NÉONATALES. . 2003. pp. 29.

ROUSSEAU, Christophe, 2009. La minéralisation des bovins au pâturage: de la théorie à la pratique. *Proceedings des JNGTV, Nantes*. 2009. pp. 150-159.

SABY, Claire, BERGER, Clémence, BLACHON, Aurélie, ORFÉO, François, MARTIN, Pascale et ABADIE, Joël, 2022a. *Tableau de bord Vaches allaitantes - Race Salers* [en ligne]. 2022. [Consulté le 11 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : https://hapy.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/072_Inst-Hautes-Pyrenees/documents/Production_Technique/Elevage/Bovin_viande/TBVA/Salers.pdf.

SABY, Claire, BERGER, Clémence, BLACHON, Aurélie, ORFÉO, François, MARTIN, Pascale et ABADIE, Joël, 2022b. *Tableau de Bord Vaches Allaitantes - Race Aubrac* [en ligne]. 2022. [Consulté le 11 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : https://hapy.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/072_Inst-Hautes-Pyrenees/documents/Production_Technique/Elevage/Bovin_viande/TBVA/Aubrac.pdf.

SCHLEGEL, P., WYSS, U., ARRIGO, Y. et HESS, H. D., 2016. Mineral concentrations of fresh herbage from mixed grassland as influenced by botanical composition, harvest time and growth stage. *Animal Feed Science and Technology*. 1 septembre 2016. Vol. 219, pp. 226-233. DOI 10.1016/j.anifeedsci.2016.06.022.

SCHLEGEL, Patrick, AMAUDRUZ, Michel et PYTHON, Pascal, 2017. Teneur minérale de l'herbage en fonction de la région et de l'altitude. *Recherche Agronomique Suisse*. 15 février 2017. Vol. 8, n° 2, pp. 56-61.

SCHLEGEL, Patrick et WYSS, Ueli, 2013. Teneur en oligo-éléments des fourrages. In : *Renc. Rech. Ruminants*. 2013. pp. 45-48.

SILIART, Brigitte, 2007. Rôle des oligo-éléments dans le stress oxydatif. *Bulletin des GTV*. 2007. N° 38, pp. 44-50.

SORDILLO, Lorraine M. et AITKEN, Stacey L., 2009. Impact of oxidative stress on the health and immune function of dairy cattle. *Veterinary Immunology and Immunopathology*. 15 mars 2009. Vol. 128, n° 1, pp. 104-109. DOI 10.1016/j.vetimm.2008.10.305.

SPEARS, Jerry W., 2003. Trace Mineral Bioavailability in Ruminants. *The Journal of Nutrition*. 1 mai 2003. Vol. 133, n° 5, pp. 1506S-1509S. DOI 10.1093/jn/133.5.1506S.

SPEARS, Jerry W. et WEISS, William P., 2008. Role of antioxidants and trace elements in health and immunity of transition dairy cows. *The Veterinary Journal*. 1 avril 2008. Vol. 176, n° 1, pp. 70-76. DOI 10.1016/j.tvjl.2007.12.015.

STEWART, Lawton, 2017. Mineral Supplements for Beef Cattle. . 2017. pp. 16.

SUTTLE, N. F., 2010. *Mineral nutrition of livestock*. 4th ed. Wallingford, Oxfordshire, UK ; Cambridge, MA : CABI. ISBN 978-1-84593-472-9. SF98.M5 U5 2010.

SWECKER, W. S., THATCHER, C. D., EVERSOLE, D. E., BLODGETT, D. J. et SCHURIG, G. G., 1995. Effect of selenium supplementation on colostral IgG concentration in cows grazing selenium-deficient pastures and on postsuckle serum IgG concentration in their calves. *American Journal of Veterinary Research*. avril 1995. Vol. 56, n° 4, pp. 450-453.

SWECKER, William S., 2014. Trace Mineral Feeding and Assessment. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. 1 novembre 2014. Vol. 30, n° 3, pp. 671-688. DOI 10.1016/j.cvfa.2014.07.008.

THOMAS, Cathy L., DARCH, Tegan, HARRIS, Paul, BEAUMONT, Deborah A. et HAEFELE, Stephan M., 2021. The Distribution of Soil Micro-Nutrients and the Effects on Herbage Micro-Nutrient Uptake and Yield in Three Different Pasture Systems. *Agronomy*. septembre 2021. Vol. 11, n° 9, pp. 1731. DOI 10.3390/agronomy11091731.

THOMPSON, R. D., JOHNSTON, J. E., BREIDENSTEIN, C. P., GUIDRY, A. J., BANERJEE, M. R. et BURNETT, W. T., 1963. Effect of hot conditions on adrenal cortical, thyroidal, and other metabolic responses of dairy heifers. *Journal of Dairy Science*. 1963. Vol. 46, pp. 227-231.

TIAN, Xue, ZHENG, Yuanyuan, LI, Yingjie, SHEN, Zhilei, TAO, Liping, DOU, Xiao, QIAN, Jianxin et SHEN, Hui, 2014. Psychological stress induced zinc accumulation and up-regulation of

ZIP14 and metallothionein in rat liver. *BMC gastroenterology*. 18 février 2014. Vol. 14, pp. 32. DOI 10.1186/1471-230X-14-32.

TREVISI, Erminio et MINUTI, Andrea, 2018. Assessment of the innate immune response in the periparturient cow. *Research in Veterinary Science*. 1 février 2018. Vol. 116, pp. 47-54. DOI 10.1016/j.rvsc.2017.12.001.

ULLAH, Hammad, KHAN, Rifat Ullah, TUFARELLI, Vincenzo et LAUDADIO, Vito, 2020. Selenium: An Essential Micronutrient for Sustainable Dairy Cows Production. *Sustainability*. janvier 2020. Vol. 12, n° 24, pp. 10693. DOI 10.3390/su122410693.

VAN EMON, Megan, SANFORD, Carla et MCCOSKI, Sarah, 2020. Impacts of Bovine Trace Mineral Supplementation on Maternal and Offspring Production and Health. *Animals : an Open Access Journal from MDPI*. 16 décembre 2020. Vol. 10, n° 12, pp. 2404. DOI 10.3390/ani10122404.

VAN SAUN, R. J., HERDT, T. H. et STOWE, H. D., 1989. Maternal and fetal selenium concentrations and their interrelationships in dairy cattle. *The Journal of Nutrition*. 1989. Vol. 119, n° 8, pp. 1128-1137. DOI 10.1093/jn/119.8.1128.

VIDAL, Jean Christophe, BONESTEBE, Mathilde, BOUCHARD, Yann, DELARUE, Estelle, MAIGRET, Corinne et BALME, Louis, 2018. *Systèmes bovins viande dans le Sud Massif Central (Aveyron, Cantal, Haut-Loire, Lozère)*. 2018.

VLASOVA, Anastasia N. et SAIF, Linda J., 2021. Bovine Immunology: Implications for Dairy Cattle. *Frontiers in Immunology*. 2021. Vol. 12, pp. 643206. DOI 10.3389/fimmu.2021.643206.

WALLACE, L. G., BOBE, G., VORACHEK, W. R., DOLAN, B. P., ESTILL, C. T., PIRELLI, G. J. et HALL, J. A., 2017. Effects of feeding pregnant beef cows selenium-enriched alfalfa hay on selenium status and antibody titers in their newborn calves. *Journal of Animal Science*. juin 2017. Vol. 95, n° 6, pp. 2408-2420. DOI 10.2527/jas.2017.1377.

WATERMAN, Richard C., VERMEIRE, Lance T., REINHART, Kurt O. et RINELLA, Matthew J., 2021. Influence of Grazing Season, Residual Herbage, and Precipitation on Rumen Extrusa Diet Quality. *Rangeland Ecology & Management*. 1 septembre 2021. Vol. 78, pp. 117-126. DOI 10.1016/j.rama.2021.06.004.

W.BLOWER, Roger et WEAVER, A. David, 2006. *GUIDE PRATIQUE DE MÉDECINE BOVINE* [en ligne]. Editions Med'com. [Consulté le 1 août 2022]. ISBN 2-914738-85-4. Disponible à l'adresse : <https://medcom.fr/produit/guide-pratique-de-medecine-bovine/>.

- WEISS, W. P., COLENBRANDER, V. F. et CUNNINGHAM, M. D., 1984. Maternal Transfer and Retention of Supplemental Selenium in Neonatal Calves. *Journal of Dairy Science*. 1 février 1984. Vol. 67, n° 2, pp. 416-420. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(84)81318-1.
- WIGGINS, Jocelyn E., GOYAL, Meera, WHARRAM, Bryan L. et WIGGINS, Roger C., 2006. Antioxidant Ceruloplasmin Is Expressed by Glomerular Parietal Epithelial Cells and Secreted into Urine in Association with Glomerular Aging and High-Calorie Diet. *Journal of the American Society of Nephrology*. 1 mai 2006. Vol. 17, n° 5, pp. 1382-1387. DOI 10.1681/ASN.2005111239.
- WILDE, D., 2006. Influence of macro and micro minerals in the peri-parturient period on fertility in dairy cattle. *Animal Reproduction Science*. 1 décembre 2006. Vol. 96, n° 3, pp. 240-249. DOI 10.1016/j.anireprosci.2006.08.004.
- WRIGHT, PI et BELL, Mc, 1966. Comparative metabolism of selenium and tellurium in sheep and swine. *American Journal of Physiology-Legacy Content*. juillet 1966. Vol. 211, n° 1, pp. 6-10. DOI 10.1152/ajplegacy.1966.211.1.6.
- WYSS, Ueli, SCHLEGEL, Patrick, FREY, Hansjörg, AKERT, Franziska et MULSER, Ester, 2018. Teneurs en nutriments et en minéraux des fourrages conservés. . 2018. pp. 8.
- XIAO, Jianxin, KHAN, Muhammad Zahoor, MA, Yulin, ALUGONGO, Gibson Maswayi, MA, Jiaying, CHEN, Tianyu, KHAN, Adnan et CAO, Zhijun, 2021. The Antioxidant Properties of Selenium and Vitamin E; Their Role in Periparturient Dairy Cattle Health Regulation. *Antioxidants*. 29 septembre 2021. Vol. 10, n° 10, pp. 1555. DOI 10.3390/antiox10101555.
- XIN, Z., WATERMAN, D.F., HEMKEN, R.W. et HARMON, R.J., 1993. Copper Status and Requirement During the Dry Period and Early Lactation in Multiparous Holstein Cows. *Journal of Dairy Science*. septembre 1993. Vol. 76, n° 9, pp. 2711-2716. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(93)77607-9.
- YATOO, Mohd Iqbal, SAXENA, Archana, DEEPA, Padinjare Melepad, HABEAB, Biju Peer, DEVI, Sarita, JATAV, Ranbir Singh et DIMRI, Umesh, 2013. Role of trace elements in animals: a review. *Veterinary World*. décembre 2013. Vol. 6, n° 12, pp. 963-967. DOI 10.14202/vetworld.2013.963-967.

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche de demande d'analyse sanguine du laboratoire Iodolab (iodolab.com)



Explorations nutritionnelles

3 Route des pierres blanches F-69290 Grézieu-la-Varenne
www.iodolab.com - contact@iodolab.com
 04 78 57 66 09

DEMANDE D'ANALYSES

PRESCRIPTEUR :
CACHET ET SIGNATURE

Tél :

Email :

PROPRIÉTAIRE :
OBLIGATOIRE SI FACTURATION PROPRIÉTAIRE

Nom :

Adresse :

Tél (impératif) :

Email (impératif) :

FACTURATION

Facturation au prescripteur

Facturation au propriétaire

Autre :

TVA si payeur :

SIREN si payeur :

TRANSMISSION DES RÉSULTATS

Prescripteur

Propriétaire

Autre :

Consultation sur www.iodolab.com
(nous demander login et mot de passe)

Par e-mail :

T° DE CONSERVATION AVANT ENVOI : Ambient Réfrigéré Congelé

Date du prélèvement :

ESPÈCE :  Bovin  Ovin  Caprin  Equin  Âne  Canin

 Felin  autre

IDENTITÉ	RACE	SEXE	ÂGE	STADE PHYSIOLOGIQUE SI RUMINANT
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie
				<input type="radio"/> Gestante <input type="radio"/> Lactation <input type="radio"/> Tarie

Pour les tarifs, veuillez consulter notre catalogue de prestations disponible sur www.iodolab.com.
 N'hésitez pas à nous contacter pour tout autre paramètre ou renseignement

⚠ PRÉCAUTIONS PARTICULIÈRES ET ENVOI

Protéger les échantillons de la lumière (en particulier pour les vitamines). Placer les échantillons au réfrigérateur jusqu'à leur envoi. Les expédier au plus vite, sous couvert du froid, en Chronopost, à :
IODOLAB - 3 Route des pierres blanches F-69290 Grézieu-la-Varenne

Editez nos bordereaux e-chrono 12€ HT ou demandez un enlèvement 23€ HT directement sur notre site internet : www.iodolab.fr
 Demandez-nous également des enlèvements chronofresh sur demande.

L'envoi d'un échantillon à notre laboratoire implique que vous avez lu et accepté nos conditions générales de vente (consultables sur notre site internet).

ANALYSES UNITAIRES

H = hépariné
F = fluorure

E = EDTA
ST = sang total

S = sec
U = urine

C = citraté
L = lait

** = paramètre sous-traité
* = accréditation 1-5728

* = frozen (<-15°C)
portée disponible sur www.cofrac.fr

OLIGO-ÉLÉMENTS

<input type="radio"/> Aluminium''	H E	500 µl
<input type="radio"/> Aluminium''	U	1 ml
<input type="radio"/> Céruloplasmine	S	100 µl
<input type="radio"/> Cobalt''	H	500 µl
<input type="radio"/> Cuivre	H	300 µl
<input type="radio"/> Cuivre''	L	25 ml
<input type="radio"/> Fer	H S	100 µl
<input type="radio"/> GSH-pxe	H ST obligatoire	1 ml
<input type="radio"/> GSH-pxp	H	100 µl
<input type="radio"/> Iode Inorganique*	H E S	600 µl
<input type="radio"/> Iode urinaire*	U	600 µl
<input type="radio"/> Iode lait*	L	1 ml
<input type="radio"/> Iode total''	H	500 µl
<input type="radio"/> Manganèse''	S	250 µl
<input type="radio"/> Manganèse''	L	25 ml
<input type="radio"/> Sélénium''	S	250 µl
<input type="radio"/> Sélénium''	L	25 ml
<input type="radio"/> TIBC/ CST	S	600 µl
<input type="radio"/> Zinc	H	300 µl
<input type="radio"/> Zinc''	L	25 ml
<input type="radio"/> Forfait 40E Zn-Cu-I-GSH	H ST obligatoire	3 ml

VITAMINES

<input type="radio"/> β-carotène	H E S	150 µl
<input type="radio"/> β-carotène	L	1 ml
<input type="radio"/> Biotine	H E S	200 µl
<input type="radio"/> Vitamine A	H E S	300 µl
<input type="radio"/> Vitamine A	L	1 ml
<input type="radio"/> Vitamine B1, B6''	E ST obligatoire	1 ml
<input type="radio"/> Vitamine B9 (folates)''	H S	250 µl
<input type="radio"/> Vitamine B12''	H E S	250 µl
<input type="radio"/> Vitamine C	H E S	300 µl *
<input type="radio"/> Vitamine 25OHD3	H E S	200 µl
<input type="radio"/> Vitamine 1,25OHD3''	H S	1 ml
<input type="radio"/> Vitamine E	H E S	350 µl

IMMUNITÉ

<input type="radio"/> IgG 🐄 🐑 🐐 🐓 🐔	H E S	200 µl
<input type="radio"/> IgG 🐷	S	200 µl
<input type="radio"/> IgG	L	1 ml
<input type="radio"/> IgA	S	200 µl
<input type="radio"/> IgA	L	1 ml
<input type="radio"/> IgM	S	200 µl
<input type="radio"/> IgM	L	1 ml

AUTRES

[]

MÉTABOLISME

<input type="radio"/> Acides biliaires	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Acide Urique	H E S	100 µl
<input type="radio"/> AGNE	H E S	100 µl
<input type="radio"/> ALAT (GPT)	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Albumine	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Albumine	L	1 ml
<input type="radio"/> Amylase pancréatique	H E S	100 µl
<input type="radio"/> ASAT (GOT)	H S	100 µl
<input type="radio"/> Bilirubine conjuguée	H S	100 µl
<input type="radio"/> Bilirubine totale	H S	100 µl
<input type="radio"/> BOH	H E S	100 µl
<input type="radio"/> C2''-C3''-C4''	H S	4 ml
<input type="radio"/> Cholestérol total	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Cholesterol HDL	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Cholesterol LDL	H E S	100 µl
<input type="radio"/> CK	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Créatinine	H S	100 µl
<input type="radio"/> Créatinine	U	1 ml
<input type="radio"/> Fructosamine	E S	100 µl
<input type="radio"/> GGT	H S	100 µl
<input type="radio"/> GLDH	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Glycémie	F	100 µl
<input type="radio"/> Lactoferrine	L	1 ml
<input type="radio"/> Lactose	L	1 ml
<input type="radio"/> LDH	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Lipase	H S	100 µl
<input type="radio"/> PAL	H S	100 µl
<input type="radio"/> Pepsinogène''	S	600 µl
<input type="radio"/> Protéines totales	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Protéines totales	L	1 ml
<input type="radio"/> Triglycérides	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Urée	H E S	100 µl
<input type="radio"/> Urée	U	1 ml
<input type="radio"/> Urée''	L	50 ml

ELECTROLYTES SANGUINS

<input type="radio"/> Bicarbonates (CO ₂)	H S	100 µl
<input type="radio"/> Calcium	H S	100 µl
<input type="radio"/> Calcium ionisé	H	500 µl
<input type="radio"/> Chlore	H S	100 µl
<input type="radio"/> Magnésium	H S	100 µl
<input type="radio"/> Phosphore	H S	100 µl
<input type="radio"/> Potassium	H	100 µl
<input type="radio"/> Sodium	H S	100 µl

ANALYSES EN POOL

pour toute demande d'analyse de mélanges, la préparation est facturée 2€

EQUILIBRE ACIDO-BASIQUE

<input type="radio"/> Acide urique	U	1 ml
<input type="radio"/> Bicarbonates (CO ₂)	U	1 ml
<input type="radio"/> Calcium	U	1 ml
<input type="radio"/> Chlore	U	1 ml
<input type="radio"/> Magnésium	U	1 ml
<input type="radio"/> Osmolarité urinaire	U	1 ml
<input type="radio"/> pH	U	1 ml
<input type="radio"/> Phosphore	U	1 ml
<input type="radio"/> Potassium	U	1 ml
<input type="radio"/> Sodium	U	1 ml
<input type="radio"/> SID	U	1 ml

ANTI-OXYDANTS

<input type="radio"/> BAPs	H E	100 µl
<input type="radio"/> d-ROMs	H S	100 µl
<input type="radio"/> OXY	H E S	100 µl
<input type="radio"/> MDA	H E	300 µl *
<input type="radio"/> SODE	H E ST obligatoire	1 ml
<input type="radio"/> TAS	H S	100 µl *

INFLAMMATION

<input type="radio"/> Fibrinogène	C	250 µl
<input type="radio"/> Haptoglobine 🐄	H E S	300 µl
<input type="radio"/> Haptoglobine 🐷	H	100 µl
<input type="radio"/> SAA	S	300 µl
<input type="radio"/> SAA3 🐄	L	1 ml

ENDOCRINOLOGIE

<input type="radio"/> ACTH''	E	200 µl
<input type="radio"/> Cortisol''	S	600 µl
<input type="radio"/> Insuline''	S	600 µl
<input type="radio"/> T4 totale''	H E S	320 µl

DIAGNOSTIC DE GESTATION

Date de saillie ou IA (min. 28 jours) : []

<input type="radio"/> PAGs (bovins)	E S	250 µl
<input type="radio"/> PAGs (ovins/caprins)	S	250 µl
<input type="radio"/> PAGs (buffles)	E	250 µl

HÉMATOLOGIE

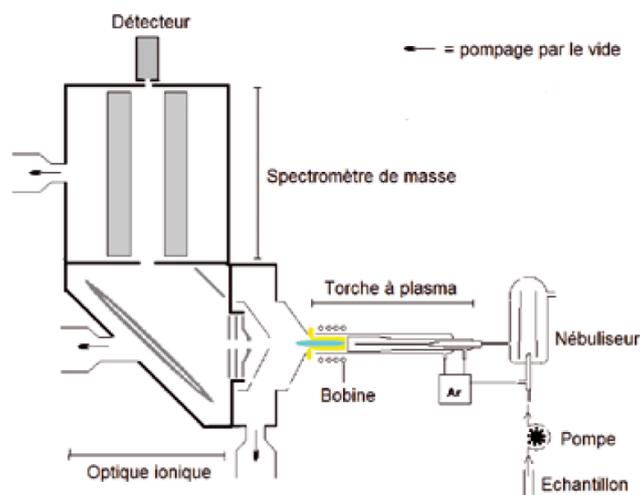
<input type="radio"/> NFS''	E ST obligatoire	1 ml
-----------------------------	------------------	------

TOXICOLOGIE

<input type="radio"/> Plomb''	E ST obligatoire	250 µl
-------------------------------	------------------	--------

Pour les tarifs, veuillez consulter notre catalogue de prestations ou notre site internet. N'hésitez pas à nous contacter pour tout autre paramètre ou renseignement

Annexe 2 : Conception de l'ICP-MS Varian® 810 (Lumet, Negriolli 2007)



Annexe 3 : Liste positive européenne mise à jour et les teneurs maximales réglementaires pour le cuivre, le zinc, l'iode et le sélénium (Règlement (CE) n° 1831/2003)

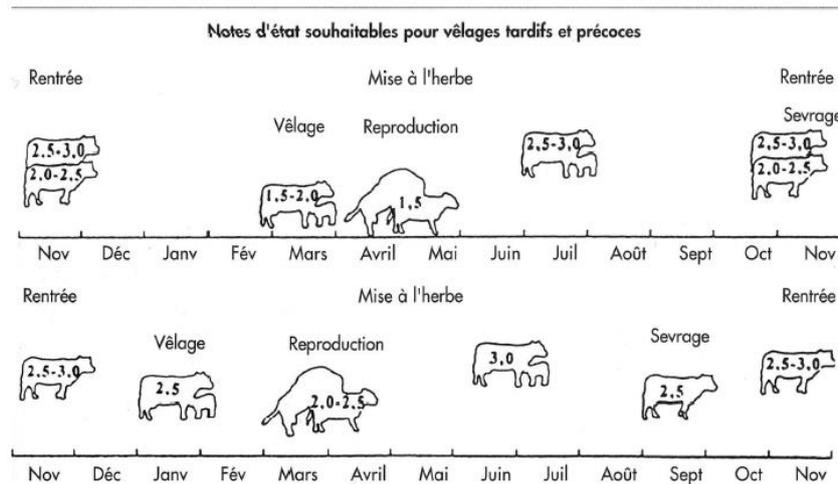
Additif nutritionnel contenant	Teneur maximale (en mg de substance active/kg d'aliment complet ayant une teneur en humidité de 12 %)	Dernière modification en date
Cuivre		
<ul style="list-style-type: none"> • Chélate de cuivre de l'hydroxy-analogue de méthionine (18 % min de cuivre) • Diacétate de cuivre (II) monohydraté (31 %) • Dihydroxycarbonate de cuivre (II) monohydraté (52 %) • Chlorure de cuivre (II) dihydraté (36 %) • Oxyde de cuivre (II) (77 %) • Sulfate de cuivre (II) pentahydraté (24 %) • Chélate de cuivre (II) et d'acides aminés hydraté (10 %) • Chélate de cuivre (II) et d'hydrolysats de protéine (10 %) • Trihydroxychlorure de dicuivre (53 % min) • Bilysinate de cuivre (> ou = 14,5 %) • Oxyde de cuivre (I) (73 %) • Chélate de cuivre (II) et de glycine hydraté (sous forme solide) (15 %) 	<p>Bovins avant le début de la rumination : 15 Autres bovins : 30</p>	<p>RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2018/1039 DE LA COMMISSION du 23 juillet 2018</p> <p>RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2020/1378 DE LA COMMISSION du 1 octobre 2020</p>

<ul style="list-style-type: none"> • (sous forme liquide) (6 %) • Chélate de cuivre de lysine et d'acide glutamique (17 à 19 %) 		
Zinc		
<ul style="list-style-type: none"> • Acétate de zinc dihydraté (29,6 % min de zinc) • Chlorure de zinc anhydre (46,1%) • Oxyde de zinc (72 %) • Sulfate de zinc heptahydraté (22 %) • Sulfate de zinc monohydraté (34 %) • Chélate de zinc et d'acides aminés hydraté (10 %) • Chélate de zinc et de glycine hydraté (solide) (15 %) (liquide) (7%) • Hydroxychlorure de zinc monohydraté (54 % min) • Chélate de zinc de l'hydroxy-analogue méthionine (17%) • Chélate de zinc de méthionine (17,5 à 18,5 %) • Chélate de zinc et d'hydrolysats de protéine (10 %) • Bis-lysinate de zinc (13,5%) • Chélate de zinc et de sulfate de méthionine (2 à 15 %) • Chélate de zinc de lysine et d'acide glutamique (17 à 19 %) 	120	<p>RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2016/1095 DE LA COMMISSION du 6 juillet 2016</p> <p>RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2019/1125 DE LA COMMISSION du 5 juin 2019</p> <p>RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2020/1373 DE LA COMMISSION du 1 octobre 2020</p>
Iode		
<ul style="list-style-type: none"> • Iodure de potassium (69 % min) • Iodure de sodium • Iodate de calcium anhydre (63,5 % min) • Granulés enrobés d'iodate de calcium anhydre (1 à 10 %) 	<p>Ruminants laitiers : 5 (pour les aliments complets : 2)</p> <p>Autres catégories d'animaux : 10</p>	RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2015/861 DE LA COMMISSION du 3 juin 2015
Sélénium		
<ul style="list-style-type: none"> • Sélénite de sodium (45 % min) • Sélénite de sodium sous forme de granulés enrobés (1 à 4,5 %) • Sélérate desodium (41 % min) • Sélénométhionine produite par <i>Saccharomyces cerevisiae</i> CNCM I-3399 (levure séléniée inactivée) <p>Teneur en sélénium organique, principalement sous forme de</p>	0,50	RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2020/377 DE LA COMMISSION du 5 mars 2020

<p>sélénométhionine (63 %), comprise entre 2 000 et 3 500 mg Se/kg (97-99 % de sélénium organique)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Levure séléniée Saccharomyces cerevisiae CNCM I-3060, inactivée ou Saccharomyces Cerevisiae NCYC R397, inactivée Préparation de sélénium organique : Teneur en sélénium : 2 000 à 2 400 mg Se/kg ; Sélénium organique > 97 à 99 % du sélénium total ; Sélénométhionine > 63 % du sélénium total • Sélénométhionine produite par Saccharomyces cerevisiae NCYC R646 (levure séléniée inactivée) Préparation de sélénium organique : Teneur en sélénium: 1000 à 2650 mg Se/kg ; Sélénium organique > 98 % de la totalité du sélénium ; Sélénométhionine > 70 % de la totalité du sélénium. • Hydroxy-analogue de Sélénométhionine Teneur en sélénium : 18 000 à 24 000 mg Se/kg ; Sélénium organique > 99 % de la totalité du Sélénium • L- sélénométhionine (< 40g/kg) • DL-sélénométhionine (1800 à 2200 mg/kg) • Sélénométhionine produite par Saccharomyces cerevisiae NCYC R645 (levure séléniée inactivée) Préparation de sélénium organique: Teneur en sélénium: 2 000 à 2 400 mg Se/kg ; Sélénium organique > 98 % du sélénium total ; Sélénométhionine > 70 % du sélénium total • L-Sélénométhionine de zinc Préparation solide de l-sélénométhionine de zinc présentant une teneur en sélénium de 1 à 2 g/kg 		
---	--	--

Annexe 4 : Grille d'évaluation européenne de la note d'état corporel des vaches allaitantes (PETIT, AGABRIEL 1993) et les objectifs lors de vêlages tardifs et précoces

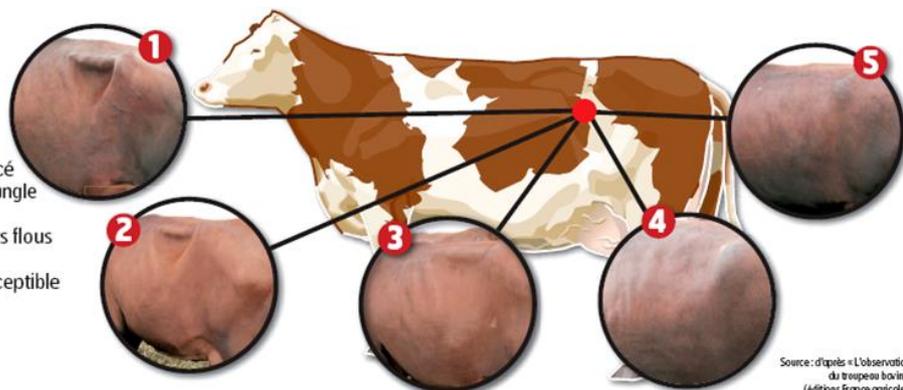
TABLEAU DE NOTATION						
Note	Vache maigre		Etat moyen		Vache grasse	
	0	1	2	3	4	5
Main gauche : sur ligament sacro-tubéral (attache de queue)	Peau adhérente	Peau tendue	Peau se décolle	Peau souple		Peau rabondie
	Pincement difficile	Pincement possible	Léger dépôt identifiable	Poignée de gras	Bonne poignée de gras	Pleine poignée de gras
Main droite : à plat sur les deux dernières côtes	Peau tendue et collée sur les côtes		Peau souple	Peau «roule» entre la main et l'os		Un épais «matelas» recouvre les côtes
	Côtes sèches	Côtes saillantes	Côtes encore bien distinctes	Dépression intercostale	Plus de dépression intercostale	



Annexe 5 : Grille d'évaluation de la note de remplissage du rumen (Lensink, Leruste 2006)

Comment se note le remplissage du rumen ?
A partir du triangle formé ou non par le creux du flanc côté gauche.

- Note 1 :** triangle très prononcé approchant presque un rectangle
- Note 2 :** triangle apparent
- Note 3 :** triangle aux contours flous sur les trois côtés
- Note 4 :** triangle à peine perceptible
- Note 5 :** triangle disparu



Source : d'après «L'observation du troupeau bovin» (éditions France agricole).

Annexe 6 : Composition chimique et minérale des fourrages analysés

Composition chimique (/kg MS)	Herbe de décembre	Herbe de mai	Foin 1	Foin 2	Foin 3	Foin 4
MAT (g)	116,43	181,80	63,81	79,12	90,66	50,57
CB (g)	358,81	232,02	341,43	312,55	337,82	359,49
Mm (g)	87,90	84,39	92,25	76,96	105,45	56,14
Ca (g)	4,77	4,23	3,11	5,99	3,26	2,21
Mg (g)	1,61	2,42	2,13	2,08	1,66	1,24
Cu (mg)	3,08	6,00	2,87	3,93	5,70	3,02
Zn (mg)	37,37	26,83	18,54	27,58	22,33	15,25

Annexe 7 : Composition des seaux de minéraux et des blocs de sel à disposition du troupeau de l'expérimentation

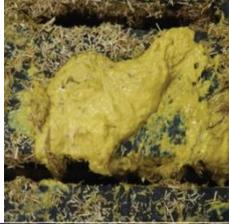
➤ Seaux de minéraux

Composition	
Mélasse de canne à sucre, chlorure de sodium, carbonate de calcium, phosphate monocalcique, oxyde magnésium, remoulage de blé, sulfate de calcium semi-hydraté, ail séché	
Constituants analytiques	
Phosphore	2,0 %
Calcium	10,0 %
Magnésium	4,0 %
Sodium	9,0 %
Additifs (garanties au kg)	
Vitamines	
Vitamine A	200 000 UI
Vitamine D3	40 000 UI
Vitamine E	1 000 UI
Oligo-éléments	
Zinc (oxyde de zinc)	6 000 mg
Manganèse (oxyde de manganèse (II))	1 500 mg
Iode (iodate de calcium anhydre)	125 mg
Cobalt (granulés enrobés de carbonate de cobalt (II))	25 mg
Sélénium (sélénite de sodium)	25 mg

➤ Blocs de sel

Composition	
Chlorure de sodium	
Composants	
Sodium	39 %

Annexe 9 : Grille pour le score fécal (Larson et al. 1977) et le dag score (Larsen, Vizard, Anderson 1995)

Score fécal			
1	Normal (ferme mais pas dur, la forme originale est légèrement déformée après être tombé sur le sol)		
2	Doux (ne tient pas la forme, s'empile mais s'étale légèrement)		
3	Liquide (se propage facilement jusqu'à environ 6 mm de profondeur)		
4	Aqueux (consistance liquide, éclaboussures)		

Un score ≥ 2 indique la présence de diarrhée

Dag score					
0	1	2	3	4	5
Pas de souillure fécale	Très légères salissures sur le bord de la queue/de chaque côté	Légères salissures sur le bord de la queue/de chaque côté	Encrassement modéré, formation de salissures	Fortes salissures, forte formation de salissures	Diarrhée aqueuse très sévère s'étendant aux jarrets
					

Annexe 10 : Calendrier des prélèvements des animaux et des fourrages

	Conduite d'élevage	Prises de sang		Prélèvements d'herbe	Prélèvements de foin	
		Vache	Veau			
2021	Mai					
	Juin	Monte naturelle				
	Juillet					
	Août					
	Septembre					
	Octobre					
	Novembre					
	Décembre				Oui	Oui
	2022	Janvier	Entrée en stabulation	8 pds ¹		Oui
		Février		8 pds ²		Oui
		Mars	Vêlage			Oui
		Avril	Vêlage / Début de lactation	5 pds ²	5 pds ²	
Mai		Début de lactation / Monte naturelle	8 pds ²	4 pds ²	Oui	
Juin		Monte naturelle	3 pds ²			

¹ envoi à l'ENVT ; ² envoi à l'ENVT et Iodolab ; pds : prise de sang

Annexe 11 : Fiche de demande d'analyse du cuivre et du zinc plasmatique (réalisation personnelle)

Analyses oligo-éléments réalisées dans le cadre de la thèse d'exercice vétérinaire de Mlle Anne-Laure GUITTARD
 Maître de thèse : Annabelle MEYNADIER



Prélèvements sanguins pour dosage de cuivre et de zinc plasmatique**

Date du prélèvement :
 Auteur du prélèvement :
 Examen demandé par :
 Nature du prélèvement (nombre) :
 Date d'envoi :

Date de réception :
 Date d'analyse :

→ **ANALYSE(S) DEMANDEE(S)** : biochimie oligo-éléments (cuivre et zinc)

Espèce	Race	Date de naissance	Sexe	N° identification	N° travail	Stade physiologique

** Feuille à conserver et à remettre à Mlle GUITTARD ou Mme MEYNADIER avec les résultats d'analyse.

Annexe 12 : Fiche de demande d'analyse des fourrages (réalisation personnelle)

Analyses minérales et nutritionnelles réalisées dans le cadre de la thèse d'exercice vétérinaire de Mlle Anne-Laure GUITTARD
Maître de thèse : Annabelle MEYNADIER



Prélèvements d'herbe ou de fourrage **

Date du prélèvement :
Auteur du prélèvement :
Examen demandé par :
Date d'envoi :

Date de réception :
Date d'analyse :

→ ANALYSE(S) DEMANDEE(S) :

- analyse minérale (zinc, cuivre, calcium, magnésium)
- analyse nutritionnelle : schéma de Weende (MS, MAT, CB, MG, Mm)

Référence	Nature du fourrage	Nature de la parcelle	Cycle et stade de récolte	Nom de la parcelle	Quantité

** Feuille à conserver et à remettre à Mlle GUITTARD ou Mme MEYNADIER avec les résultats d'analyse.

Annexe 13 : Sampling design des parcelles pâturées en novembre et décembre 2021



GUITTARD Anne-Laure

Titre : Évaluation du statut en oligo-éléments de vaches allaitantes multipares autour de la mise-bas en système herbager

Résumé : Notre étude analyse l'évolution de la cuprémie, de la zincémie, de l'iode inorganique plasmatique et de l'activité enzymatique de la glutathion peroxydase érythrocytaire, autour de la mise-bas, chez huit vaches allaitantes multipares de race Salers et Aubrac. Elles sont nourries exclusivement avec des fourrages d'herbe et reçoivent une complémentation minérale sous forme de seau à lécher. Les rations, au pâturage comme en stabulation, sont déficitaires en oligo-éléments. Par conséquent, les vaches sont carencées. Cependant, le statut en oligo-éléments de leur veau est correct mais leur taux de morbidité est très élevé. Les carences chez les mères entraînent alors une baisse de l'immunité de leur veau. Ils ne sont donc pas préparés à lutter contre les pathogènes présents dans l'environnement. Pour corriger ces carences, une complémentation minérale doit être adaptée aux rations tout en prenant en compte de la difficulté de leur distribution au pâturage.

Mots-clés : Statut en oligo-éléments, vaches allaitantes, système herbager, cuivre, zinc, iode, sélénium

Title : Evaluation of the trace element status of multiparous suckler cows around calving time in a grassland system

Summary : Our study analyzes the evolution of cupremia, zincemia, plasma inorganic iodine and erythrocyte glutathione peroxidase enzymatic activity, around parturition, in eight multiparous Salers and Aubrac suckling cows. They were fed exclusively with grass fodder and received a mineral supplementation in the form of a lick bucket. The rations, both in pasture and in stall, are deficient in trace elements. Consequently, the cows are deficient. However, the trace element status of their calves is correct but their morbidity rate is very high. The deficiencies in the cows lead to a decrease in the immunity of their calves. They are therefore not prepared to fight against pathogens present in the environment. To correct these deficiencies, mineral supplementation must be adapted to the rations while taking into account the difficulty of their distribution on pasture.

Keywords : Trace element status, suckler cows, grassland system, copper, zinc, iodine, selenium