

VETAGRO SUP
CAMPUS VETERINAIRE DE LYON

Année 2013 - Thèse n°

***EVALUATION DU STATUT MINERAL DES BOVINS PAR LA TECHNIQUE
D'ANALYSE DES MINERAUX DANS LES POILS : ETUDE
EXPERIMENTALE SUR 30 ELEVAGES ALLAITANTS CHAROLAIS***

THESE

Présentée à l'UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON I

(Médecine - Pharmacie)

et soutenue publiquement le 04 octobre 2013

pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

par

TETU Camille

Né le 13/06/1988

à Montluçon (03)



VetAgro Sup



Liste des enseignants du Campus Vétérinaire de Lyon 1/2

Civilité	Nom	Prénom	Unité pédagogique	Grade
M.	ALOGNINOUIWA	Théodore	Pathologie du bétail	Professeur
M.	ALVÈS DE OLIVEIRA	Laurent	Gestion des élevages	Maître de conférences
Mme	ARCANGIOLI	Marie-Anne	Pathologie du bétail	Maître de conférences
M.	ARTOIS	Marc	Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
M.	BARTHÉLÉMY	Anthony	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences Contractuel
Mme	BECKER	Claire	Pathologie du bétail	Maître de conférences
M.	BELLI	Patrick	Pathologie morphologique animaux de compagnie	Maître de conférences Contractuel
Mme	BELLUCO	Sara	Pathologie morphologique animaux de compagnie	Maître de conférences
Mme	BENAMOU-SMITH	Agnès	Équine	Maître de conférences
M.	BENOIT	Etienne	Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	BERNY	Philippe	Biologie fonctionnelle	Professeur
Mme	BONNET-GARIN	Jeanne-Marie	Biologie fonctionnelle	Professeur
Mme	BOULOCHER	Caroline	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
M.	BOURDOISEAU	Gilles	Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
M.	BOURGOIN	Gilles	Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
M.	BRUYÈRE	Pierre	Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Maître de conférences Contractuel
M.	BUFF	Samuel	Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Maître de conférences
M.	BURONFOSSE	Thierry	Biologie fonctionnelle	Maître de conférences
M.	CACHON	Thibaut	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences Contractuel
M.	CADORÉ	Jean-Luc	Pathologie médicale des animaux de compagnie	Professeur
Mme	CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
M.	CAROZZO	Claude	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
M.	CHABANNE	Luc	Pathologie médicale des animaux de compagnie	Professeur
Mme	CHALVET-MONFRAY	Karine	Biologie fonctionnelle	Maître de conférences
M.	COMMUN	Loïc	Gestion des élevages	Maître de conférences
Mme	DE BOYER DES ROCHES	Alice	Gestion des élevages	Maître de conférences Stagiaire
Mme	DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	DEMONT	Pierre	Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
Mme	DESJARDINS-PESSON	Isabelle	Équine	Maître de conférences Contractuel
Mme	DJELOUADJI	Zorée	Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
Mme	ESCRIOU	Catherine	Pathologie médicale des animaux de compagnie	Maître de conférences
M.	FAU	Didier	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Professeur
Mme	FOURNEL	Corinne	Pathologie morphologique animaux de compagnie	Professeur
M.	FRANCK	Michel	Gestion des élevages	Professeur
M.	FREYBURGER	Ludovic	Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
M.	FRIKHA	Ridha	Pathologie du bétail	Maître de conférences
M.	GENEVOIS	Jean-Pierre	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Professeur
Mme	GILOT-FROMONT	Emmanuelle	Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	GONTHIER	Alain	Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
Mme	GRAIN	Françoise	Gestion des élevages	Professeur
M.	GRANCHER	Denis	Gestion des élevages	Maître de conférences
Mme	GRÉZEL	Delphine	Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
M.	GUÉRIN	Pierre	Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Professeur
Mme	GUÉRIN -FAUBLÉE	Véronique	Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
Mme	HUGONNARD	Marine	Pathologie médicale des animaux de compagnie	Maître de conférences

Liste des enseignants du Campus Vétérinaire de Lyon 2/2

Civilité	Nom	Prénom	Unité pédagogique	Grade
M.	JUNOT	Stéphane	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
M.	KECK	Gérard	Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	KODJO	Angeli	Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
Mme	LAABERKI	Maria-Halima	Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences Stagiaire
M.	LACHERETZ	Antoine	Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
Mme	LAMBERT	Véronique	Gestion des élevages	Maître de conférences
Mme	LE GRAND	Dominique	Pathologie du bétail	Maître de conférences
Mme	LEBLOND	Agnès	Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
Mme	LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	Équine	Maître de conférences
M.	LEPAGE	Olivier	Équine	Professeur
Mme	LOUZIER	Vanessa	Biologie fonctionnelle	Maître de conférences
M.	MARCHAL	Thierry	Pathologie morphologique animaux de compagnie	Professeur
Mme	MIALET	Sylvie	Santé Publique et Vétérinaire	Inspecteur en santé publique vétérinaire
Mme	MICHAUD	Audrey	Gestion des élevages	Maître de conférences Stagiaire
M.	MOUNIER	Luc	Gestion des élevages	Maître de conférences
M.	PÉPIN	Michel	Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
M.	PIN	Didier	Pathologie morphologique animaux de compagnie	Maître de conférences
Mme	PONCE	Frédérique	Pathologie médicale des animaux de compagnie	Maître de conférences
Mme	PORTIER	Karine	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
Mme	POUZOT-NEVORET	Céline	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences Stagiaire
Mme	PROUILLAC	Caroline	Biologie fonctionnelle	Maître de conférences
Mme	RÉMY	Denise	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Professeur
M.	ROGER	Thierry	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Professeur
M.	SABATIER	Philippe	Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	SAWAYA	Serge	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
Mme	SÉGARD	Émilie	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences Contractuel
Mme	SERGEANTET	Delphine	Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
Mme	SONET	Juliette	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences Contractuel
M.	THIÉBAULT	Jean-Jacques	Biologie fonctionnelle	Maître de conférences
M.	VIGUIER	Éric	Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Professeur
Mme	VIRIEUX-WATRELOT	Dorothée	Pathologie morphologique animaux de compagnie	Maître de conférences Contractuel
M.	ZENNER	Lionel	Santé Publique et Vétérinaire	Professeur

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur Claude GHARIB

De la Faculté de Médecine de Lyon

Qui nous fait le grand honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse,
Pour sa disponibilité,
Qu'il reçoive ici l'expression de ma gratitude et de mes hommages respectueux.

A Monsieur le Professeur Laurent ALVES DE OLIVEIRA

Du Campus Vétérinaire de Lyon de VetAgro Sup

Qui nous a fait l'honneur d'encadrer ce travail,
Pour ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de ces deux années,
Qu'il trouve ici l'assurance de ma plus profonde reconnaissance.

A Monsieur le Professeur Denis GRANCHER

Du Campus Vétérinaire de Lyon de VetAgro Sup

Qui nous a fait l'honneur de faire partie de notre jury de thèse,
Pour avoir accepté de juger ce travail,
Qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

Au Laboratoire d’Alimentation du Campus Vétérinaire de Lyon de VetAgro Sup

Pour le financement de cette étude, sans lequel ce travail n’aurait pu exister.

Au Cabinet Vétérinaire SCP Chateau-Thierry à Saint Désiré (03)

Pour leur aide précieuse pour la mise en œuvre de ce travail.

Aux Eleveurs

Pour avoir accepté de participer à cette étude.

**Au Laboratoire Protec Serom (Fondettes ; 37), au Laboratoire IODOLAB (Marcy l’Etoile ; 69)
et au Laboratoire d’Alimentation de l’Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse**

Pour leurs participations à ce projet et leurs disponibilités.

A Elise, à ma Famille, et à mes Amis.

SOMMAIRE

Liste des enseignants du Campus Vétérinaire de Lyon 1/2	3
Liste des enseignants du Campus Vétérinaire de Lyon 2/2	4
REMERCIEMENTS	5
TABLE DES ILLUSTRATIONS	13
Figures.....	13
Tableaux	14
Photos	17
Annexes.....	17
ABREVIATIONS.....	19
INTRODUCTION.....	21
PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	23
I - Composition minérale des poils des bovins	23
A - Structure des poils des Bovins	23
1 - Constitution d'un poil de bovin	23
a - La tige pileire	24
b - Le follicule pileux.....	25
c - Les annexes du poil.....	27
2 - Types de poils	29
B - Croissance des poils : le cycle pileire.	29
C - Mécanismes d'incorporation des minéraux dans le poil	31
1 - Sources endogènes	31
2 - Sources exogènes.....	32
II - Analyse minérale des poils : les techniques utilisées	33

A - Préparation de l'échantillon.....	33
1 - Nettoyage de l'échantillon.	33
2 - Minéralisation de l'échantillon	35
B - Les différentes techniques de dosage	36
1 - Spectrophotométrie d'absorption atomique	36
2 - La spectrométrie d'émission au plasma.....	37
C - Conclusion	37
III - Facteurs de variation de la concentration minérale des poils des bovins.....	38
A - Facteurs de variations liées à l'alimentation	38
1 - Effet du niveau alimentaire des minéraux sur leur propre concentration pilaire ..	39
a - Le Zinc	39
b - Cuivre.....	41
c - Sélénium	42
d - Calcium	43
e - Phosphore.....	44
f - Fer, Magnésium, Manganèse	45
2 - Effet du niveau alimentaire d'un élément minéral sur les concentrations pilaires des autres minéraux	46
a - Concentration pilaire en Zinc.....	46
b - Concentration pilaire en Cuivre	47
c - Concentration pilaire en Sélénium	47
d - Concentration pilaire en Fer	48
e - Concentration pilaire en Manganèse.....	48
B - Facteurs de variation dépendant de l'animal prélevé.....	48
1 - L'âge	49

a - Zinc	49
b - Cuivre.....	50
c - Calcium et Phosphore.....	50
d - Fer, Magnésium et Manganèse	51
2 - Le sexe	52
3 - Couleur du poil.....	52
a - Zinc	53
b - Cuivre.....	53
c - Sélénium	53
d - Calcium, Phosphore, Magnésium, Fer et Manganèse	54
2 - La race	54
C - Facteurs de variation dépendant du mode de prélèvement	55
1 - Saison de prélèvement.....	55
2 - Localisation sur le corps	56
3 - Portion du poil	57
D - Facteurs de variation dépendant de l'environnement	57
IV – Conclusion sur les informations apportées par l'analyse minérale des poils.....	60
DEUXIEME PARTIE :.....	65
ETUDE EXPERIMENTALE SUR 30 ELEVAGES ALLAITANTS CHAROLAIS	65
I - Matériel et méthode.....	65
A - Choix des élevages et des bovins prélevés :	65
B - Prélèvement et collecte d'information :.....	68
C - Le dosage des oligoéléments :	70
1 - Dans les poils :	70
2 - Dans le sang :	71

a - Le Sélénium	71
b - Le Cuivre et le Zinc	72
D - Traitement des données :	72
1 - Classement des élevages en fonction de leur niveau de complémentation en oligoélément :	72
2 - Classement des élevages en fonction de leur concentration sanguine en oligoélément :	74
3 - Comparaison statistique des différentes données obtenues :	75
II - Résultats	76
A - Comparaison entre la concentration pilaire et la complémentation alimentaire en oligoélément :	76
1 - Zinc :	76
2 - Cuivre :	78
3 - Sélénium :	80
B - Comparaison entre la concentration pilaire et la concentration sanguine en oligoélément	82
1 - Zinc	82
2 - Cuivre	84
3 - Sélénium	87
C - Comparaison entre la concentration sanguine et la complémentation alimentaire en oligoélément	90
1 - Zinc :	90
2 - Cuivre :	92
3 - Sélénium :	94
D - Incidence de la présence de métaux galvanisés dans l'élevage sur la concentration pilaire en Zn	96

III - Discussion.....	97
CONCLUSION.....	105
Bibliographie.....	107

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 : Section longitudinale d'un poil de mammifère (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006)	24
Figure 2 : Coupe transversale d'une tige pileuse de poil de mammifère (DUNNETT, 2002)	24
Figure 3 : schéma d'une coupe transversale d'un follicule pileux (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006)	26
Figure 4 : Annexes d'un poil (NOLI, 1999)	27
Figure 5 : Représentation schématique du cycle pileux (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006)	30
Figure 6 : Spectrophotométrie d'absorption atomique (GALEZ, 2011)	36
Figure 7 : Localisation de Saint Désiré dans le département de l'allier (03)	66
Figure 8 : Délimitation géographique de la clientèle de la clinique vétérinaire de Saint-Désiré (SCP Chantreau-Thiercy)	67
Figure 9 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pileuses en Zn des élevages en fonction de leur complémentation en Zn	76
Figure 10 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pileuses en Cu des élevages en fonction leur complémentation en Cu	78
Figure 11 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pileuses en Se des élevages en fonction de leur complémentation en Se.....	80
Figure 12 : Diagramme de dispersion représentant la concentration pileuse en Zn en fonction de la concentration plasmatique en Zn de l'élevage (moyenne des valeurs individuelles) observée sur 30 élevages.....	82
Figure 13 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pileuses en Zn des élevages en fonction de leur statut en Zn obtenu par analyse sanguine	83

Figure 14 : Diagramme de dispersion représentant la concentration pilaire en Cu en fonction de la concentration plasmatique en Cu de l'élevage (moyenne des valeurs individuelles) observée sur 30 élevages.....	85
Figure 15 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pilaires en Cu de l'élevage en fonction de leur statut en Cu obtenu par analyse sanguine	85
Figure 16 : Diagramme de dispersion représentant la concentration pilaire en Se en fonction de l'activité de la glutathion-peroxydase érythrocytaire de l'élevage (moyenne des valeurs individuelles) observée sur 30 élevages	87
Figure 17 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pilaires en Se de l'élevage en fonction de leur statut en Se obtenu par analyse sanguine	88
Figure 18 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations plasmatiques en Zn des élevages (moyennes des valeurs individuelles) en fonction de leur niveau de complémentation en Zn	90
Figure 19 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations plasmatiques en Cu des élevages (moyennes des valeurs individuelles) en fonction de leur niveau de complémentation en Cu	92
Figure 20 : Diagrammes en boîte des distributions des activités de la glutathion-peroxydase érythrocytaire des élevages (moyennes des valeurs individuelles) en fonction de leur niveau de complémentation en Se	94
Figure 21 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pilaires en Zn des élevages en fonction de la présence ou non de tubes métalliques galvanisés dans l'environnement des bovins	96

Tableaux

Tableau 1 : Procédure de lavage des poils recommandée par l'agence internationale de l'énergie atomique (LABAT, 2010).....	34
---	----

Tableau 2 : Apports du dosage pilaire en Zn, Cu et Se : Facteurs de variation de leur concentration pilaire (<i>n</i> : nombre de publications).....	61
Tableau 3 : Apports du dosage pilaire en Ca, P et Fe : Facteurs de variation de leur concentration pilaire (<i>n</i> : nombre de publications).....	62
Tableau 4 : Apports du dosage pilaire en Mg et Mn : Facteurs de variation de leur concentration pilaire (<i>n</i> : nombre de publications).....	63
Tableau 5 : Composition de la cure en oligoélément la plus répandue au sein des élevages prélevés (<i>les chiffres entre parenthèse sont les rapports de l'apport quotidien réalisé lors de la cure par rapport à l'apport quotidien recommandé par l'INRA (MESCHY, 2007)</i>).....	70
Tableau 6 : Apports quotidiens recommandés par l'INRA en Cu, Se et Zn (MESCHY, 2007) ...	73
Tableau 7 : Valeurs usuelles permettant l'obtention du statut nutritionnel en oligoélément d'un élevage selon le premier tercile des concentrations individuelles (ENJALBERT, et al., 2006)	74
Tableau 8 : Concentration pilaire en Zn des élevages en fonction de la pratique de complémentation en Zn (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))	77
Tableau 9 : Table de contingence décrivant la répartition des pratiques de complémentation et des statuts en Zn observées sur 30 élevages.....	77
Tableau 10 : Concentration pilaire en Cu des élevages en fonction du niveau de complémentation en Cu (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))	78
Tableau 11 : Table de contingence décrivant la répartition des pratiques de complémentation et des statuts en Cu observées sur 30 élevages.....	79
Tableau 12 : Concentration pilaire en Se des élevages en fonction de leur niveau de complémentation en Se (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))	80
Tableau 13 : Table de contingence décrivant la répartition des niveaux de complémentation et des statuts en Se observées sur 30 élevages.....	81

Tableau 14 : Concentration pilaire en Zn des élevages en fonction du statut en Zn déterminé par analyse sanguine (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))	83
Tableau 15 : Table de contingence décrivant la répartition des statuts en Zn obtenus par analyse pilaire ou par analyse sanguine observées sur 30 élevages	84
Tableau 16 : Concentration pilaire en Cu des élevages en fonction du statut en Cu déterminé par analyse sanguine (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))	86
Tableau 17 : Table de contingence décrivant la répartition des statuts en Cu obtenus par analyse pilaire ou par analyse sanguine observée sur 30 élevages.....	86
Tableau 18 : Concentration pilaire en Se des élevages en fonction du statut en Se déterminé par analyse sanguine (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))	88
Tableau 19 : Table de contingence décrivant la répartition des statuts en Se obtenus par analyse pilaire ou par analyse sanguine observée sur 30 élevages.....	89
Tableau 20 : Concentration plasmatique en Zn des élevages en fonction du niveau de complémentation en Zn (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))	91
Tableau 21 : Table de contingence décrivant la répartition des niveaux de complémentation et des statuts en Zn observée sur 30 élevages	91
Tableau 22 : Concentration plasmatique en Cu des élevages en fonction du niveau de complémentation en Cu (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))	92
Tableau 23 : Table de contingence décrivant la répartition des niveaux de complémentation et des statuts en Cu observée sur 30 élevages.....	93
Tableau 24 : Concentration sanguine en Se des élevages en fonction du niveau de complémentation en Se (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))	94

Tableau 25 : Table de contingence décrivant la répartition des niveaux de complémentation et des statuts en Se observés sur 30 élevages.....	95
Tableau 26 : Concentration pilaire en Zn des élevages en fonction de la présence ou non de tubes métalliques galvanisés dans l’environnement des bovins.....	97
Tableau 27 : Table de contingence décrivant la répartition des niveaux de complémentation et des statuts en Cu obtenus par analyse sanguine (normes de LAMAND (1987)) observée sur 30 élevages.....	101

Photos

Photo 1 : Tubes et cornadis galvanisés présents en abondance dans les élevages bovins (Jourdain, 2013).....	59
Photo 2 : Prélèvement de sang dans la veine jugulaire externe	68
Photo 3 : Prélèvement de poil à la base caudale du chignon.....	69

Annexes

Annexe 1 : Concentrations pilaires en zinc, cuivre et sélénium des 30 élevages prélevés ...	113
Annexe 2 : Concentrations plasmatiques en zinc individuelles des 300 vaches prélevées (<i>inf. : Infection ou inflammation</i>)	114
Annexe 3 : Concentrations plasmatiques en cuivre individuelles des 300 vaches prélevées (<i>inf. : Infection ou inflammation</i>)	115
Annexe 4 : Activités de la GSH-pxe individuelles des 300 vaches prélevées	116
Annexe 5 : Valeurs des complémentations en Zn, Cu et Se des 30 élevages	117

ABREVIATIONS

°C : degrés Celsius

μmol/kgMS : micromole(s) par kilogramme de matière sèche de la ration alimentaire

μmol/l : micromole(s) par litre

Ca : Calcium

Cd : Cadmium

Cu : Cuivre

Fe : Fer

g : gramme

GSH-pxe : glutathion-peroxydase érythrocytaire

K : coefficient de concordance Kappa-Cohen

Kg : kilogramme

kgMS : kilogramme de matière sèche de la ration alimentaire

km : kilomètre

mg : milligramme

Mg : Magnésium

Mn : Manganèse

Mo : Molybdène

N : nombre

Na₂SeO₄ : Sélénate de sodium

p : degré de signification d'un test statistique (p-value)

P : Phosphore

ppm : partie par million

r : coefficient de corrélation linéaire

rp : coefficient de corrélation monotone de Spearman

R² : coefficient de détermination (pourcentage de variation expliqué par la relation linéaire)

S : Soufre

Se : Sélénium

SeMet : Séléno-méthionine

Zn : Zinc

INTRODUCTION

Au milieu du 19^{ème} siècle, Casper (1857 – 1858) utilise pour la première fois l'analyse pilaire afin de détecter la présence d'arsenic sur des corps de victimes suspectées d'empoisonnement 11 ans après les faits. C'est seulement 100 ans plus tard que le poil est utilisé dans le but de monitorer des expositions aux métaux lourds, de détecter des drogues ou encore d'établir des statuts nutritionnels en minéraux (DUNNETT, 2002).

Il y a donc une soixantaine d'année que le poil est utilisé afin d'établir des statuts en minéraux des humains et animaux. Depuis une trentaine d'année, de nouvelles techniques de dosages des minéraux ont été développées, permettant de doser de nombreux éléments minéraux simultanément sur un seul échantillon de poils. C'est seulement avec le développement de ces techniques que l'utilisation des poils comme support de dosage des minéraux a véritablement augmenté. En effet, ces nouvelles techniques rendent le coût d'une analyse minérale pilaire moindre. Ainsi, sur le terrain, les éleveurs de bovins se voient proposer ce genre d'analyse, et il n'est pas rare que les vétérinaires se retrouvent confrontés à une demande d'interprétation des résultats de ces analyses de la part des éleveurs. Cependant, il n'existe pas, à ce jour, de consensus afin de statuer sur la validité ou non de cette technique de détermination des statuts en minéraux des bovins.

Dans cette thèse, il sera présenté, dans un premier temps, une revue des données bibliographiques sur l'analyse pilaire des minéraux, et dans un deuxième temps, une expérience sur 30 élevages allaitants de race charolaise afin d'évaluer l'intérêt d'une analyse pilaire pour déterminer le statut nutritionnel en oligoélément des élevages.

PREMIERE PARTIE : ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

I - Composition minérale des poils des **bovins**

La peau des bovins est en majeure partie recouverte de poils. Ces phanères, caractéristiques des mammifères, ont un rôle important dans l'isolation thermique de l'animal ainsi que dans sa perception sensorielle. De plus, les poils offrent une protection de la peau contre les agents chimiques et les blessures physiques (SCOTT, 1990; SCOTT, 1988).

Dans un premier temps nous étudierons la structure des poils de bovins ainsi que leur mécanisme de croissance. Ensuite, nous étudierons les différents mécanismes d'incorporation des minéraux dans le poil.

A - Structure des poils des Bovins

1 - Constitution d'un poil de bovin

Les poils sont des structures flexibles et kératinisées produites à la surface cutanée par les follicules pileux. Le poil présente une partie distale « libre » ou tige pileire et une partie proximale enchâssée dans l'épaisseur du tégument ou racine pileire (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006). De plus, chaque follicule pileux est accompagné par des annexes au sein du tégument (*cf Figure 1*).

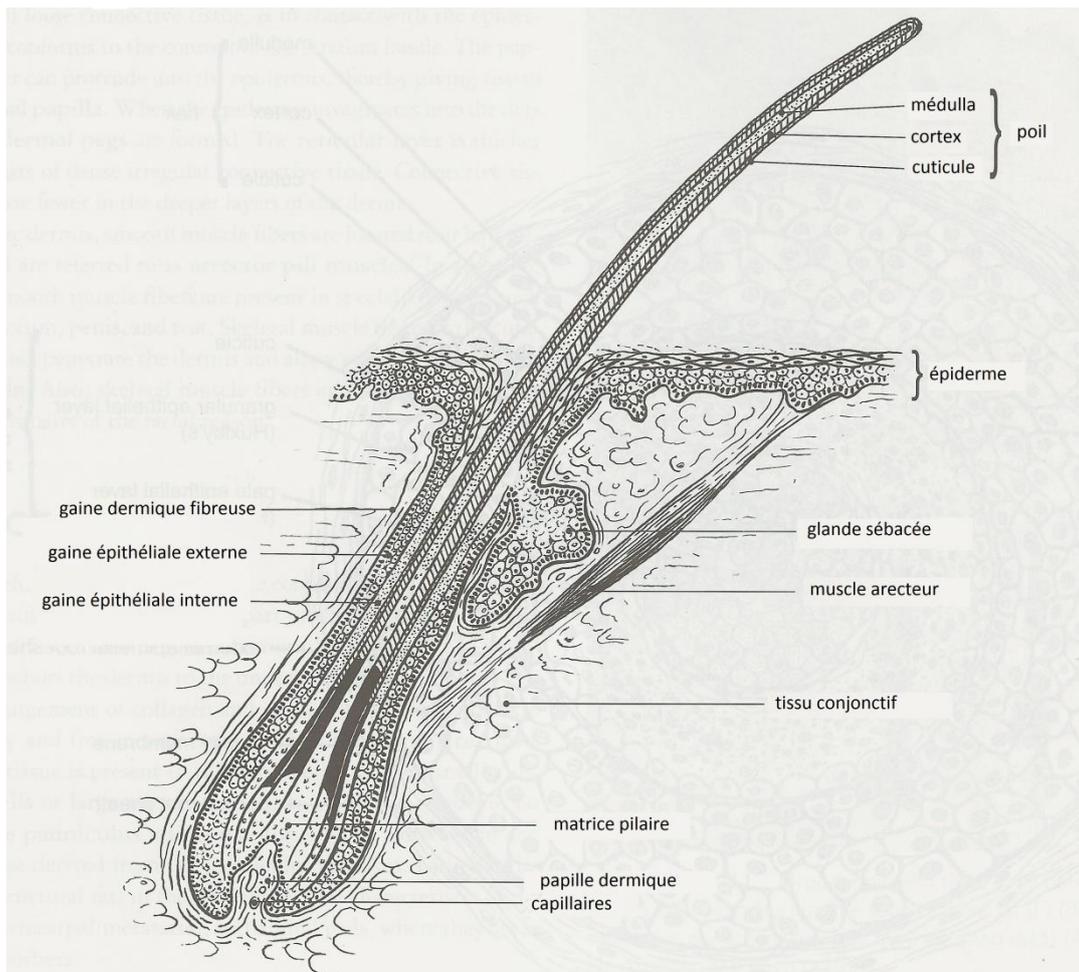


Figure 1 : Section longitudinale d'un poil de mammifère (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006)

a - La tige pileaire

La tige pileaire est usuellement divisée en trois parties (ou couches) concentriques : la cuticule, le cortex et la médulla (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006; SCOTT, 1990) (cf Figure 2).

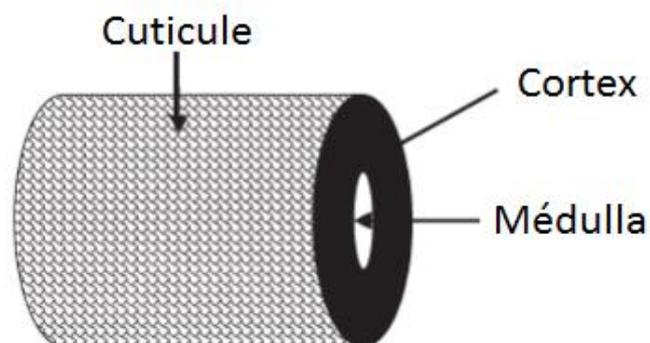


Figure 2 : Coupe transversale d'une tige pileaire de poil de mammifère (DUNNETT, 2002)

***La cuticule** est la couche la plus externe. Elle est formée d'une simple couche de cellules anucléées, plates et kératinisées. Ces cellules sont disposées telles des tuiles sur un toit, avec leurs parties libres dirigées vers la partie distale du poil.

***Le cortex** est la couche intermédiaire, composée de cellules kératinisées et fusiformes dont l'axe longitudinal est orienté parallèlement au poil. Cette couche de cellules est à l'origine de la couleur du poil grâce aux pigments contenus dans ces cellules.

***La médulla** forme le centre du poil, avec des rangées de cellules cubiformes. La médulla est solide au niveau de la racine pileuse, mais dans le reste de la tige pileuse elle présente des espaces d'air entre les cellules.

*Certains auteurs ajoutent à ces trois couches une quatrième : **l'épicuticule**. C'est une couche amorphe dérivée des cellules de la cuticule, composée des sécrétions exocellulaires de ces cellules ainsi que des débris de leurs membranes cellulaires.

La tige pileuse du poil est une structure biologiquement morte. Elle conserve ses propriétés physiques grâce à l'arrangement cellulaire des trois couches décrites ci-dessus et grâce aux liens intercellulaires forts unissant les cellules entre elles.

b - Le follicule pileux

La partie enchâssée du poil est comprise dans le follicule pileux (*cf Figure 1*). En effet, dans le derme, la racine pileuse est entourée par deux couches, la gaine épithéliale interne et externe. Le tout est en relation avec le derme par l'intermédiaire d'une membrane basale et d'une gaine fibreuse d'origine dermique (*cf Figure 3*). Enfin, cette gaine dermique est liée à sa base à la papille dermique située juste en dessous de la matrice pileuse (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006; SCOTT, 1990; SCOTT, 1988).

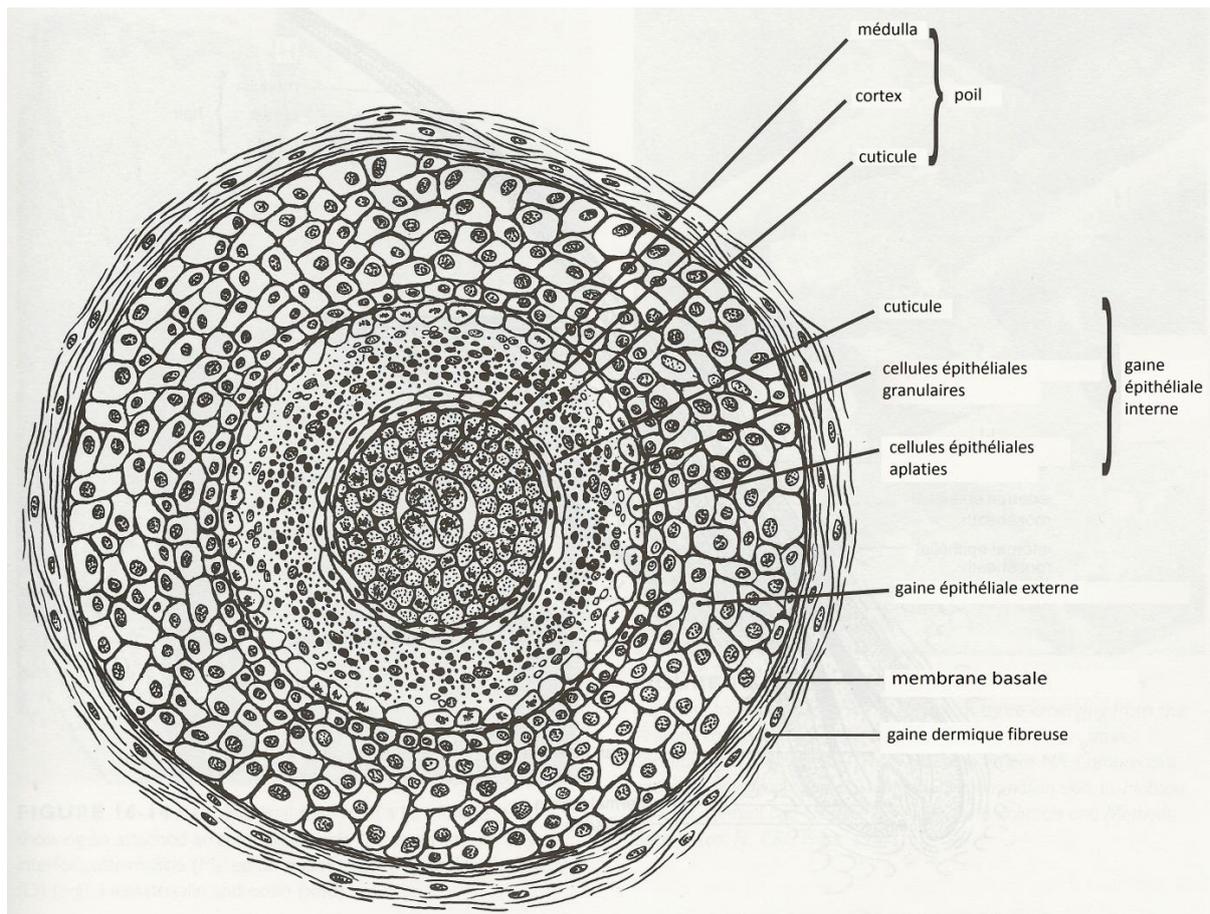


Figure 3 : schéma d'une coupe transversale d'un follicule pileux (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006)

***La gaine épithéliale interne** est composée de plusieurs couches concentriques de cellules servant de moule au poil. La couche la plus interne, la cuticule, est similaire à la cuticule de la tige pileuse à l'exception de l'orientation inverse des cellules. Cet arrangement permet une solide implantation de la racine pileuse dans le follicule. Cette gaine se kératinise au niveau de l'isthme (région s'étendant de l'abouchement de la glande sébacée à l'insertion du muscle arcteur) et se désintègre pour faire partie du sébum.

***La gaine épithéliale externe** est formée par des couches cellulaires similaires à l'épiderme avec lequel elle est en continuité dans la portion haute du follicule. Cette gaine est de plus en plus fine et de moins en moins kératinisée en direction de la papille dermique.

*Ces gaines épithéliales sont entourées par deux autres structures dermiques, une **membrane basale** en contact direct avec la gaine épithéliale externe et **une gaine fibreuse** richement irriguée par des vaisseaux sanguins.

***La papille dermique** est en continuité avec la gaine dermique décrite ci-dessus. Cette région composée de tissus conjonctifs richement vascularisés par des plexus vasculaires, est située juste en dessous d'une couche de cellules épithéliales nucléées à fort pouvoir mitotique, **la matrice pileaire**. Cette matrice cellulaire donne naissance non seulement à la gaine épithéliale interne mais surtout aux cellules qui vont se kératiniser pour former le poil.

c - Les annexes du poil

Le poil est intimement lié à des structures annexes que sont le muscle arcteur, la glande sébacée et la glande apocrine (ou sudoripare) comme le montre le schéma ci-dessous (cf Figure 4).

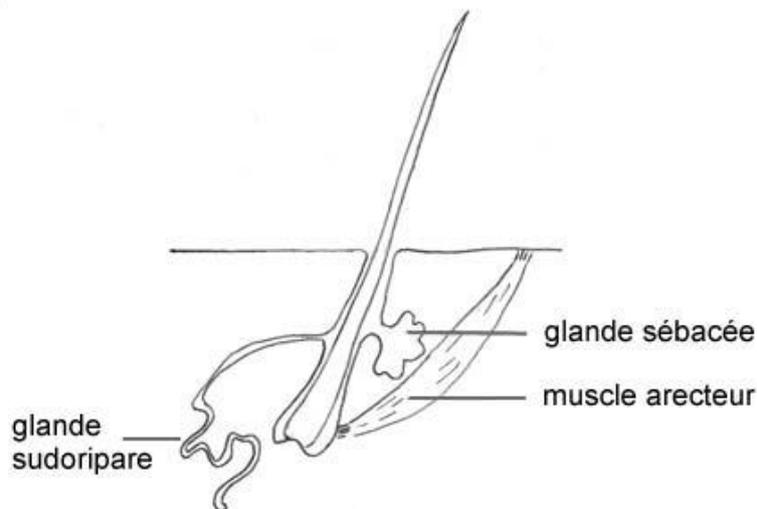


Figure 4 : Annexes d'un poil (NOLI, 1999)

***Le muscle arecteur** est un muscle lisse prenant origine dans le derme superficiel et s'attachant au renflement présent à la base du follicule pileux. Ce muscle généralement plus développé sur la ligne dorsale du corps est innervé par une composante orthosympathique et permet une piloérection qui serait impliquée dans les mécanismes de thermorégulation et de défense de l'animal (SCOTT, 1988). La contraction de ce muscle permet aussi la vidange de la glande sébacée (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006).

*Deux glandes sont annexées à chaque follicule : **la glande sébacée** est une glande acineuse, exocrine, richement vascularisée et toujours associée à un follicule pileux. Elle sécrète du sébum dans la lumière folliculaire via le canal pilosébacé et le sébum est ensuite drainé en direction de la surface cutanée par la croissance du poil. Cette sécrétion principalement composée de lipides et de débris cellulaires agit comme un agent antibactérien et imperméabilisant. **La glande sudoripare épitrichiale** (anciennement appelée glande apocrine) est une structure simple tubulaire localisée dans le derme profond. Cette glande est, elle aussi, annexée à un follicule pileux dans lequel sa sécrétion se déverse. En effet, son canal excréteur débouche juste au dessous de la glande sébacée. Cette sécrétion, qui se mélange avec le sébum, a un rôle dans la communication inter et intra espèces (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006; SCOTT, 1988).

Ainsi le poil « baigne » dans les sécrétions de la glande sébacée et dans une moindre mesure de la glande sudoripare au sein du follicule pileux.

*Il existe d'autres glandes, **les glandes sudoripares atrichiales** (anciennement appelées glandes eccrines), qui sont, elles, indépendantes des follicules pileux. Chez les chevaux et bovins, contrairement aux carnivores, ces glandes sont très nombreuses et jouent un rôle prépondérant dans la thermorégulation par la sécrétion de sueur à la surface cutanée. Ainsi, chez le bovin, la partie libre des poils se trouve au contact de cette sécrétion riche en eau et électrolytes.

2 - Types de poils

Chez les bovins comme chez les chevaux, le pelage est uniquement composé de follicules simples qui sont uniformément répartis sur la majeure partie de la surface corporelle. En effet, chez les bovins, chaque poil provient d'un follicule pileux différent. Ainsi, chez ces espèces, chaque follicule est associé à une glande sébacée et apocrine ainsi qu'à un muscle arcteur (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006; SCOTT, 1988).

B - Croissance des poils : le cycle pileux.

Contrairement à la surface de l'épiderme, le follicule pileux ne présente pas un processus de kératinisation continue. En effet, les cellules de la matrice pileuse connaissent régulièrement une période de quiescence durant laquelle il n'y a pas d'activité mitotique et par conséquent arrêt de croissance du poil. A l'occasion de la reprise de multiplication cellulaire au sein du follicule pileux un nouveau poil est formé. C'est cette activité cyclique des follicules pileux qui permet le changement de pelage des mammifères domestiques selon les saisons (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006; SCOTT, 1990).

On distingue plusieurs phases de croissance du poil correspondant chacune à des apparences histologiques différentes du follicule pileux : la phase anagène, catagène et télogène. Ces trois phases sont illustrées par la *Figure 5*.

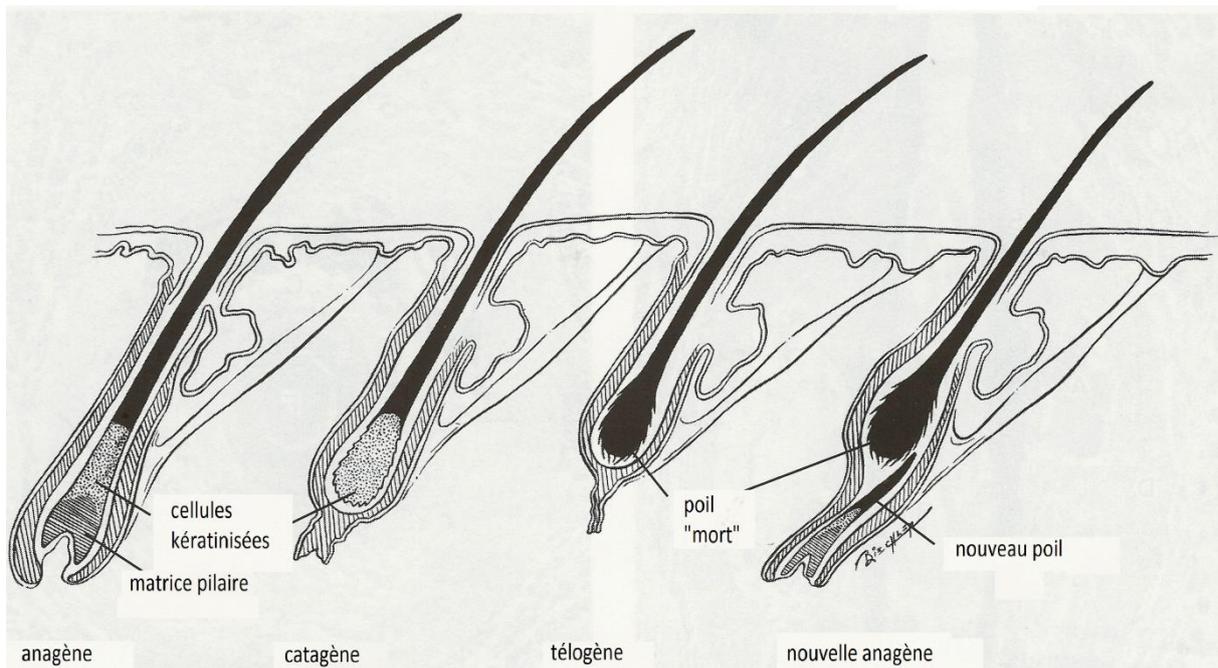


Figure 5 : Représentation schématique du cycle pileux (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006)

***La phase anagène** est la phase productive du follicule pileux. Cette phase se caractérise par une forte activité mitotique des cellules de la matrice pileire. Les cellules issues de ce processus subissent ensuite une kératinisation et forment le nouveau poil. Suite à cette phase, le follicule entre en phase catagène.

***La phase catagène** est une période marquée par une baisse prononcée de l'activité métabolique du follicule pileux qui, à cette occasion, migre en direction de la surface cutanée conduisant à la transformation du bulbe pileire en une colonne fragile et désorganisée de cellules. Ensuite le follicule entre en phase télogène.

***La phase télogène** est une phase de quiescence au cours de laquelle la croissance stoppe totalement. La papille dermique et le poil ne sont plus connectés et le bulbe pileire est situé au niveau de l'abouchement du canal pilosébacé. Suite à cette période, l'activité mitotique et la kératinisation reprennent au niveau de la matrice pileire et un nouveau poil est ainsi formé. Le nouveau poil pousse au fur et à mesure que le poil du cycle précédent est poussé vers la surface cutanée provoquant à terme sa chute.

La succession de ces différentes phases constitue le cycle pilaire. La durée des différentes phases du cycle pilaire est déterminée génétiquement, mais est aussi contrôlée par de nombreux facteurs comme la durée du jour, la température ambiante, l'alimentation, le statut physiologique et pathologique et les hormones (œstrogène, testostérone, stéroïdes surrénaliens et hormones thyroïdiennes) (MONTEINEIRO-RIVIERE, 2006; SCOTT, 1990). Chez les bovins, le nombre de cycles varie entre deux et trois cycles par an en moyenne (COMBS, et al., 1982).

C - Mécanismes d'incorporation des minéraux dans le poil

Le poil est en majeure partie constitué d'une protéine, l' α -kératine (85 à 93% en moyenne de sa composition). Ce sont ces protéines et les ponts disulfures les rassemblant entre elles qui font du poil un support stable dans le temps, remarquablement résistant à la digestion enzymatique et à de nombreux agents chimiques. Les autres composants du poil sont l'eau (4 à 13 %), les lipides (2 à 3%) et les cendres (0,23 à 0,8%). La partie minérale apparaît donc peu abondante par rapport aux autres constituants (LAMAND, et al., 1990; SCOTT, 1990).

Des minéraux et oligo-éléments peuvent être incorporés dans le poil à partir de plusieurs sources, endogènes et exogènes (pollution, cosmétique, environnement) (SCOTT, 1990).

1 - Sources endogènes

Le premier mécanisme d'incorporation de minéraux dans le poil est basé sur **l'apport en minéraux au follicule pilaire** pendant la formation du poil, c'est-à-dire en phase anagène. En effet, le follicule pilaire étant richement vascularisé (notamment la papille et les gaines dermiques), durant les processus de mitose, différenciation et maturation, des macro- et

micro-éléments intègrent les nouvelles cellules pilaires formées (COMBS, 1987). Ceci explique la présence de minéraux au sein des poils des bovins dès leur formation.

Cependant ce n'est ni la seule source endogène d'incorporation de minéraux, ni la plus importante. En effet, les sécrétions glandulaires ont un rôle majeur dans la composition minérale des poils :

Les sécrétions sébacées et sudoripares baignant le poil au sein du follicule pileux permettent aux minéraux présents en majeure partie dans le sébum d'intégrer la trame pilaire. De plus chez les bovins, les poils sont aussi continuellement exposés aux minéraux contenus dans la sueur sécrétée par les **glandes sudoripares atrichiales** (nombreuses chez les bovins). Cette sécrétion est principalement composée d'eau, de sodium, de potassium, d'urée, d'acides lactique et pyruvique. Cependant, elle contient aussi des quantités significatives de minéraux, notamment du calcium, du phosphore, du cuivre, du manganèse et du zinc (COMBS, 1987).

Certains minéraux contenus dans ces sécrétions se fixent à la trame pilaire grâce à une liaison avec la kératine et la mélanine. La mélanine étant le pigment majoritaire des poils, ce mécanisme d'incorporation des minéraux dans les poils peut poser problème pour comparer des concentrations pilaires sur des animaux de couleurs différentes (WYSOCKI & KLETT, 1971).

2 - Sources exogènes

Les sources exogènes de minéraux pour les poils sont nombreuses dans l'environnement des bovins. Cette voie d'incorporation ne reflétant en aucun cas l'alimentation du bovin, elle relève de la contamination minérale des poils. Ainsi ces interactions seront développées plus loin dans le chapitre «III - Facteurs de variation de la concentration minérale des poils de bovins ; D - Facteurs de variation dépendant du mode de prélèvement ».

II - Analyse minérale des poils : les techniques utilisées

Comme nous l'avons vu précédemment, il existe des sources endogènes et des sources exogènes d'incorporation de minéraux au sein de la trame pilaire. Le but d'une analyse de minéraux étant de refléter un statut alimentaire, il est nécessaire d'effectuer un pré - traitement aux poils afin d'essayer de s'affranchir de la composante exogène d'incorporation de minéraux.

De nombreuses techniques sont décrites afin de doser les minéraux dans les poils. Les méthodes utilisées actuellement par les laboratoires nécessitent une minéralisation préalable de l'échantillon (LAMAND, et al., 1990).

A - Préparation de l'échantillon.

1 - Nettoyage de l'échantillon.

Le but de cette étape est d'éliminer les minéraux d'origine exogène qui ont été incorporés à la trame pilaire sans pour autant altérer celle-ci. En effet, la contamination par le milieu extérieur des phanères étant importante, la réalisation d'un nettoyage est essentielle (HILDERBRAND & WHITE, 1974).

Cependant, il est convenu qu'il est impossible d'éliminer les minéraux d'origine exogène sans modifier la fraction d'origine endogène. Il est donc conseillé d'adopter une méthode de référence, toujours appliquée, afin que cet éventuel biais soit toujours identique (LABAT, 2010; LAMAND, et al., 1990; MANSON & ZLOTKIN, 1985; DeANTONIO, et al., 1982).

Dans un premier temps, un solvant organique (comme l'acétone) est utilisé pour éliminer les corps gras ainsi que les particules collées au poil. Ensuite, un détergent (ionique ou non) peut être utilisé, comme le Sodium Laurysulfate. L'utilisation des détergents est responsable d'une importante diminution des concentrations des éléments contenus dans la trame pileire (LABAT, 2010; SCHAPCOTT, 1978; PETERING, et al., 1971). Par ailleurs, HILDERBRAND et WHITE (1974) mettent en garde contre l'utilisation d'agent chélatant pour le nettoyage de l'échantillon. En effet, dans leurs travaux, ils montrent que de telles substances ne solubilisent pas seulement les agents de contamination de surface et que notamment les concentrations en Zinc, Calcium et Magnésium sont significativement diminuées dans la trame pileire (HILDERBRAND & WHITE, 1974).

On a donc une grande diversité de produits utilisables, ce qui affecte potentiellement le résultat final de l'analyse à suivre (ZLOTKIN, 1985). Ainsi, dans le but d'obtenir un biais de mesure identique pour tous les laboratoires à défaut de pouvoir l'annuler, l'agence internationale de l'énergie atomique (IAEA) propose une méthode de référence constituée de plusieurs lavages avec de l'acétone, de l'eau déminéralisée puis à nouveau de l'acétone (LABAT, 2010; LAMAND, et al., 1990; RYABUKHIN, 1980).

Tableau 1 : Procédure de lavage des poils recommandée par l'agence internationale de l'énergie atomique (LABAT, 2010)

Acétone : 3 fois 10 min. à température ambiante
Eau permutée : 3 fois 10 min.
Acétone : 3 fois 10 min. à température ambiante

Pour finir, dans tous les cas, il est essentiel d'avoir recours à des rinçages à l'eau déminéralisée afin d'éliminer tous les solvants utilisés et les sels solubilisés. Cette étape est importante et primordiale pour la fiabilité des résultats (PETERING, et al., 1971).

Ainsi, la concentration minérale de la trame pileire dépend fortement de l'efficacité de ce nettoyage à éliminer les contaminants extérieurs et aussi de l'agressivité des produits utilisés envers l'intégrité de la trame pileire. Ainsi, des résultats obtenus par des laboratoires

utilisant différentes méthodes de nettoyage ne peuvent pas être comparés (LAMAND, et al., 1990; MANSON & ZLOTKIN, 1985; ZLOTKIN, 1985).

2 - Minéralisation de l'échantillon

Cette étape conduisant à la minéralisation totale de l'échantillon, n'est réalisée que si la technique d'analyse des minéraux la nécessite. Cependant les techniques utilisées actuellement se réalisent toutes après une réduction préalable de l'échantillon en cendre (LABAT, 2010; LAMAND, et al., 1990). Cette étape permet de limiter, voire de faire disparaître les interférences liées à la matière organique et réalise en outre une concentration des éléments ce qui améliore la sensibilité du dosage à suivre (LABAT, 2010).

Pour ce faire, deux méthodes existent : la chaleur sèche ou bien la chaleur humide (SCHROEDER & NASON, 1971).

Pour la **chaleur sèche**, la mise en place dans un four à 400-450 °C convient à la plupart des oligo-éléments. Cependant, les éléments volatils, notamment le Sélénium, l'Iode, et le Fluor, voient leur concentration affectée par un tel traitement (SCHROEDER & NASON, 1971). Pour pallier à ce problème, le recours à un procédé, toujours en chaleur sèche, mais à des températures plus basses est possible.

On peut aussi utiliser la **chaleur humide** en utilisant des produits tels que l'acide nitrique, sulfurique ou perchlorique en présence d'agent oxydant comme de l'eau oxygénée. L'inconvénient de ces deux méthodes est que seulement une petite quantité d'échantillon (1 à 2 g) peut être minéralisé à la fois. La méthode par chaleur humide est rapide, généralement pas plus de 30 minutes, alors qu'en utilisant la chaleur sèche à basse température, il faut au moins 24 à 48 heures de traitement thermique (LABAT, 2010; SCHROEDER & NASON, 1971).

Afin de réduire encore le temps de cette étape, il est possible d'associer un **système de calcination** (minéralisation assistée par micro-ondes) à la digestion chimique de l'échantillon (LABAT, 2010).

B - Les différentes techniques de dosage

Actuellement, quatre techniques sont utilisées pour le dosage des métaux dans les matrices biologiques comme les poils : la spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme (SAA), la spectrophotométrie d'absorption atomique électrothermique (SAA-ET), la spectrométrie d'émission au plasma d'argon (ICP) et la spectrométrie d'émission en plasma induit couplée à une spectrométrie de masse (ICP-MS) (LABAT, 2010).

1 - Spectrophotométrie d'absorption atomique

Cette technique consiste en la pulvérisation de la solution d'éléments minéraux à l'aide d'une flamme (SAA) ou bien à l'aide d'un four graphite (SAA-ET). Ces éléments ainsi pulvérisés sont soumis à un rayonnement constitué des raies caractéristiques de l'élément à mesurer, délivrées par une source lumineuse. Sous l'effet de ce rayonnement, les atomes passent d'un état fondamental à un état excité tout en absorbant une partie du rayonnement. Ensuite, le rayonnement passe dans un monochromateur afin de sélectionner seulement la bande de longueurs d'ondes avec laquelle on veut travailler. Pour finir, un détecteur mesure l'intensité du rayonnement transmis (*cf Figure 6*). Ainsi en comparant cette intensité transmise avec ou sans l'échantillon à mesurer, on en déduit la concentration de l'élément recherché (PINTA, 1971).

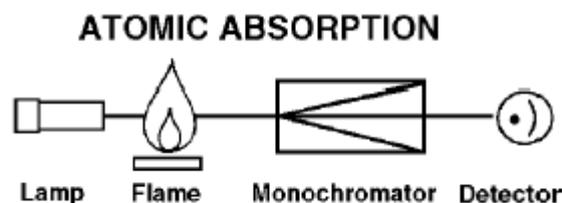


Figure 6 : Spectrophotométrie d'absorption atomique (GALEZ, 2011)

La sensibilité de la méthode utilisant un four graphite est meilleure que celle utilisant une flamme. De plus, cette méthode, donnant la possibilité de contrôler la température à tout moment, est plus appropriée pour le dosage des oligo-éléments volatils comme le Plomb, le Cadmium et le Sélénium (IYENGAR, et al., 1993).

2 - La spectrométrie d'émission au plasma.

Les éléments à mesurer passent ici dans une torche à plasma d'argon à très haute température. Ce passage permet l'atomisation et l'ionisation de la plupart des atomes. Les atomes ainsi excités émettent des radiations afin de revenir à leur état fondamental. La détermination des concentrations est basée en ICP classique sur la mesure de l'intensité de ces radiations (MOESCH, 2007; PINTA, 1971).

Dans le cas où la spectrométrie d'émission au plasma est couplée à une spectrométrie de masse (ICP-MS), les éléments ionisés sont transférés dans un analyseur de masse capable de trier les ions selon leur rapport masse/charge et les concentrations en différents éléments sont ainsi obtenues (MOESCH, 2007).

L'ICP-MS est une méthode qui combine grande sensibilité et analyses multi-élémentaires, le tout réalisable sur un échantillon réduit de poils, ce qui est particulièrement recherché pour la réalisation d'un profil en oligo-élément (GOULLE, et al., 2005; IYENGAR, et al., 1993).

C - Conclusion

Les méthodes d'analyses présentent donc beaucoup de variabilité susceptible de donner des valeurs différentes. Ainsi, pour limiter au maximum la divergence des résultats, l'American Medical Association préconise de standardiser la collecte, le lavage et l'analyse des échantillons de poils (LAMAND, et al., 1990).

A l'heure actuelle, l'absence de consensus sur la procédure à suivre pour le traitement des poils ne permet pas de comparer les résultats de plusieurs laboratoires s'ils n'utilisent pas le même protocole.

III - Facteurs de variation de la concentration minérale des poils des bovins

L'intérêt premier en médecine vétérinaire de réaliser un dosage de minéraux sur les poils des bovins est d'obtenir des informations sur les niveaux d'apports alimentaires en minéraux. Cependant, le fait que la concentration pilaire en minéraux reflète leur apport alimentaire reste controversé. En effet, les poils sont notamment soumis constamment au milieu extérieur, source potentielle de contamination de la matrice pilaire (GOULLE, et al., 2005).

Nous verrons ainsi, dans un premier temps, les facteurs alimentaires à l'origine de variation de la concentration pilaire en minéraux, et dans un deuxième temps, les autres facteurs pouvant influencer cette concentration.

A - Facteurs de variations liées à l'alimentation

L'alimentation minérale peut influencer de différentes manières la teneur pilaire en minéraux. En effet, pour un élément minéral donné, son niveau d'apport dans l'aliment peut influencer sa propre quantité au sein de la trame pilaire, mais peut aussi, comme nous le verrons à la fin de ce chapitre, influencer la quantité des autres éléments minéraux dans les poils.

1 - Effet du niveau alimentaire des minéraux sur leur propre concentration pilaire

a - Le Zinc

Le zinc est l'élément minéral sur lequel le plus d'expériences ont été réalisées afin de statuer sur la relation entre l'apport alimentaire en Zn et sa concentration dans les poils.

REINHOLD *et al.*, ont montré, en 1968, sur des rats que la concentration pilaire en Zinc est, au moins en partie, due aux apports alimentaires en Zinc. Seulement, la valeur de cette concentration n'est pas nécessairement le reflet de la sévérité de la carence alimentaire (REINHOLD, *et al.*, 1968). En effet, deux études réalisées sur des rats établissent des corrélations linéaires entre l'apport alimentaire en Zn et sa concentration pilaire (respectivement $p < 0,001$; $R^2 = 0,43$ à $0,46$ et $p < 0,01$; $R^2 = 0,28$) (COMBS, *et al.*, 1983; DEEMING & WEBER, 1977). Il apparaît donc que seulement 28% et 46% de la variation de la concentration pilaire est due à un apport différent en Zn chez les rats.

De même, chez les ruminants, des études montrent que la quantité de Zinc dans les poils de veaux et de chevreaux est significativement plus faible ($p < 0,05$) avec un régime alimentaire pauvre en Zn (6ppm) qu'avec un régime alimentaire supplémenté en Zn (de 40 mg/kgMS) (MILLER, *et al.*, 1966; MILLER, *et al.*, 1965).

Ainsi, une relation entre l'apport en Zn dans l'alimentation et sa teneur pilaire est bien présente mais semble être faible, ce qui rend l'interprétation de la concentration pilaire de Zn difficile pour statuer sur les apports alimentaires en Zn.

Cependant, sur les chevaux, on ne retrouve pas les corrélations observées auparavant sur les rats. Une étude sur un effectif important de chevaux (N=391) ne met en

évidence aucune corrélation ($p > 0,05$) entre l'apport alimentaire en Zn (obtenue par analyse de l'alimentation) et la concentration pileire de celui-ci (WELLS & RALSTON, 1990).

Il en est de même chez les bovins. En effet, une série de sept expérimentations réalisées sur des bovins de race Hereford (N=150) montre que la relation entre teneur pileire en Zn et apport alimentaire en Zn est très inconstante (BEESON, et al., 1977). De plus, chez les chèvres, une supplémentation en Zn sur 3 mois ne présente pas d'impact concluant sur la concentration pileire de cet élément (PAVLATA, et al., 2011).

L'effet du niveau d'apport en Zn sur sa teneur pileire est donc très controversé, d'autant que ces dernières études sont réalisées sur un nombre important d'animaux. L'utilisation de la concentration pileire en zinc pour obtenir des informations sur son niveau d'apport alimentaire ne semble donc pas une donnée adéquate.

De plus, la forme chimique sous laquelle le Zn est apporté à l'animal pourrait influencer son incorporation au sein de la trame pileire.

Une expérience sur vingt-quatre chiens supplémentés en Zn démontre une différence dans l'incorporation du Zn au sein de la trame pileire selon la forme chimique sous laquelle il est apporté. En effet, les chiens supplémentés avec du chélate de zinc d'acides aminés hydratés présente une quantité deux fois plus importante ($p < 0,05$) de Zn dans les poils que chez les chiens supplémentés avec de l'oxyde de zinc ou du sulfate de zinc (LOWE, et al., 1994).

Cependant, chez les chèvres, quelle que soit la forme sous laquelle le Zinc est apporté (Oxyde de Zinc ; Lactate de Zinc ; Chélate de Zinc) une supplémentation en Zn sur 3 mois ne présente pas d'impact concluant sur la concentration pileire de cet élément (PAVLATA, et al., 2011).

Ainsi, malgré le peu d'étude traitant du sujet, si la forme chimique par laquelle le Zn est apporté semble avoir un effet sur son incorporation dans les poils chez le chien, ceci ne semble être pas le cas chez les ruminants.

Les résultats très contradictoires de ces publications ne nous apportent donc pas de preuve suffisante pour établir une relation constante entre la concentration pilaire et l'apport alimentaire en Zn chez le bovin.

b - Cuivre

Chez le porc, une augmentation significative ($p < 0,01$) de la concentration pilaire en Cu est observée entre trois différents niveaux d'apports en Cu (7, 25 et 257 ppm) (HEDGES & KORNEGAY, 1973).

Des résultats similaires sont obtenus sur les bovins. En effet, la quantité de Cu dans les poils de veaux de race Holstein et Hereford augmente significativement ($p < 0,01$) avec la quantité de Cu (2,5 ; 10 et 70,1ppm) apportée par l'alimentation (O'MARY, et al., 1970). Le même constat est effectué lors d'une autre étude réalisée sur des veaux de race Jersiaise (SUTTLE & ANGUS, 1976).

Dans une étude ne portant que sur 5 bovins, une diminution linéaire ($R=0,89$) de la concentration pilaire en Cu en fonction du nombre de jours depuis le moment où les bovins sont soumis à une alimentation pauvre en Cu (1,5mg/KgMS) est observée jusqu'à vingt-sept semaines (SUTTLE & McMURRAY, 1983).

En accord avec ces résultats, la concentration pilaire en Cu peut refléter l'apport alimentaire en Cu, notamment lors d'une longue carence. En effet, la teneur pilaire en Cu semble diminuer avec la durée de la carence alimentaire en cet élément.

Cependant, l'étude la plus récente, réalisée sur trois cent quatre-vingt-onze chevaux, ne met en évidence aucune corrélation ($p > 0,05$) entre l'apport alimentaire en Cu (évalué par analyse de l'alimentation) et la concentration pilaire de celui-ci (WELLS & RALSTON, 1990).

Cette dernière publication n'est pas réalisée chez les bovins, mais contrairement aux autres études, elle est réalisée sur un grand effectif ($N=391$), ce qui est important pour la mise en évidence d'une corrélation linéaire.

Ainsi, même si les études réalisées sur les bovins tendent à établir une influence de l'apport alimentaire en Cu sur sa concentration pilaire, cette relation entre l'alimentation en Cu et sa teneur dans les poils de bovin reste controversée.

c - Sélénium

Sur les rats, une augmentation significative ($p < 0,001$) de la teneur en Se dans les poils quand l'apport alimentaire en Se augmente (0,5 ; 1,5 et 2,5 $\mu\text{g/g}$) est observé après huit semaines d'apport constant (SALBE & LEVANDIER, 1990).

Il en est de même chez les bovins. En effet, lors d'une étude portant sur 48 bovins, une augmentation de la concentration pilaire en Se est observée avec l'augmentation des apports alimentaires en Se (PERRY, et al., 1976).

Ces publications semblent donc établir une relation de l'apport en Se dans l'alimentation des bovins sur sa concentration pilaire, même si les études réalisées ne mettent en évidence que des différences de concentration pilaire en fonction du niveau d'apport et non une relation forte comme une corrélation linéaire.

Pour finir, HIDIROGLOU *et al.* ont montré sur des vaches gestantes (N=76) ayant une alimentation pauvre en Se qu'aucun des veaux nés d'une vache ayant une forte concentration pilaire en Se ($>0,24$ ppm) n'a déclaré une myopathie-dyspnée, contrairement à ceux nés des vaches ayant une faible concentration pilaire en Se ($<0,12$ ppm) où 40% des veaux ont déclaré une myopathie-dyspnée (HIDIROGLOU, et al., 1965).

Cette dernière étude établit donc un facteur de risque augmenté pour le veau de contracter une myopathie-dyspnée (maladie provoquée par la carence en Se du bovin) si la concentration en Se dans les poils de sa mère est faible.

L'influence la forme chimique sous laquelle le Se est apporté a aussi été étudiée.

Sur des rats recevant des apports en Se sous deux formes différentes (forme inorganique (Na_2SeO_4), et forme organique (SeMet)) pendant huit semaines, la quantité de Se pilaire est deux à trois fois supérieure ($p < 0,001$) quand le Se est apporté sous forme organique plutôt que sous forme de sel de sodium (SALBE & LEVANDIER, 1990).

Cette tendance est retrouvée chez les chèvres. En effet, la concentration pilaire moyenne obtenue avec des chèvres recevant le Se sous forme organique (SeMet) est supérieure ($270\mu\text{g}/\text{Kg}$) à celle recevant une forme inorganique (Na_2SeO_4 avec $200,5\mu\text{g}/\text{Kg}$), sans que cette différence soit statistiquement significative. Selon les auteurs, ce manque de significativité est dû au faible effectif (cinq chèvres par groupe) (PAVLATA, et al., 2011).

Malgré le fait que ceci ne soit statistiquement prouvé que chez les rats, il semble que la forme organique de Se soit incorporée dans la trame pilaire de manière plus importante que les formes inorganiques.

Le niveau de Se dans l'alimentation semble influencer sa teneur dans les poils. Mais, bien qu'une étude révèle une relation entre la teneur en Se des poils de bovins gestants et la survenue de myopathie-dyspnée chez le veau, le faible nombre d'études réalisées sur cette relation ne permet pas de statuer de façon ferme sur l'existence d'une telle relation. De plus, la forme sous laquelle le Se est apporté influence autant sa teneur dans les poils que la quantité de Se qui est apportée (SALBE & LEVANDIER, 1990).

d - Calcium

Lors d'une étude menée sur des poneys de race Shetland où différents niveaux d'apports en Ca sont réalisés pendant 193 jours, chaque mois, les poneys dont les concentrations pilaires en Ca sont les plus basses sont ceux recevant le plus haut apport de Ca (2,05%) et inversement les plus hautes concentrations pilaires sont imputables au plus faible apport en Ca (0,43%). Même si les différences entre ces moyennes ne s'avèrent pas

significativement différentes, il n'en est pas moins vrai que ces moyennes sont rangées dans l'ordre inverse des apports alimentaires (WYSOCKI & KLETT, 1971).

Il en est de même chez le porc. En effet, aucune différence entre les concentrations pilaires en Ca pour deux niveaux d'apport en Ca n'est observable lors de deux études de 192 porcs. Les plus fortes concentrations pilaires sont attribuées au plus haut niveau d'apport en Ca dans une première étude et au plus bas niveau dans une seconde étude (KORNEGAY, et al., 1981).

Enfin, sur des chevaux (N=391) une très faible corrélation négative ($p < 0,05$ et $R^2 = 0,016$) entre l'apport alimentaire en Ca (obtenu par analyse de l'alimentation) et la concentration pilaire est observée (WELLS & RALSTON, 1990). Ainsi, malgré un coefficient de détermination (R^2) significativement différent de 0 ($p < 0,05$), ce résultat révèle que le niveau d'apport en Ca explique seulement 1,6% des variations observées sur la concentration pilaire en Ca.

Ainsi, le Ca pilaire paraît clairement ne pas refléter la quantité de Ca apportée à l'animal par l'alimentation. L'utilisation à vocation « d'évaluation du niveau alimentaire en Ca » de l'analyse pilaire ne semble donc pas justifiée (COMBS, 1987).

e - Phosphore

Chez le porc, des apports en P supérieurs aux apports recommandés (125%) entraînent une augmentation significative des teneurs pilaires en P par rapport au niveau d'apport recommandé. Cependant, avec un niveau d'apport en P inférieur aux apports recommandés (75%) on n'obtient pas des concentrations pilaires en P plus basses qu'avec les apports recommandés (KORNEGAY, et al., 1981).

Chez les poneys, de la même manière que pour le Ca, les concentrations pilaires en P les plus basses sont obtenues avec le plus haut apport de P (1,72%), et inversement le plus hautes concentrations sont imputables au plus faible apport en P (0,39%). Les différences entre ces concentrations ne s'avèrent pas significativement différentes, mais il n'en est pas

moins vrai que ces moyennes fluctuent dans le sens inverse des apports alimentaires (WYSOCKI & KLETT, 1971).

Une très faible corrélation négative ($p < 0,05$ et $R^2 = 0,075$) entre l'apport alimentaire en P (évalué par analyse de l'alimentation) et la concentration pilaire de celui-ci est observée sur 391 chevaux (WELLS & RALSTON, 1990). Ainsi, dans cet essai, l'apport alimentaire explique seulement 7,5% des variations de sa teneur dans les poils.

Enfin, cette relation entre l'apport en P et sa teneur dans les poils a aussi été recherchée chez les bovins. En effet, des dosages du P contenu dans l'alimentation reçue par de bovins ainsi que le dosage dans les poils des bovins n'ont pas permis d'obtenir un coefficient de corrélation significativement différent de 0 ($p < 0,05$) entre les deux mesures (COHEN, 1973).

Les données obtenues lors de ces différentes expériences n'apportent donc pas de preuve de l'existence d'une relation entre la quantité de P au sein de la trame pilaire et le niveau d'apport en P dans l'alimentation. De plus, comme le montrent KORNEGAY *et al.* sur des porcs, la teneur pilaire ne semble pas être affectée par une diminution des apports en P (KORNEGAY, *et al.*, 1981). Il apparaît donc difficile de détecter des carences alimentaires en P au moyen de l'analyse pilaire.

Il est donc généralement inutile d'avoir recours à l'analyse pilaire afin de statuer sur les apports alimentaires en P (COMBS, 1987).

f - Fer, Magnésium, Manganèse

Peu de données sont disponibles quant à la relation entre l'alimentation en Fe, Mg et Mn et son incorporation dans les poils.

Dans une étude incluant soixante porcs alimentés pendant neuf semaines avec deux apports différents en Fe (101 et 312 ppm), non seulement aucune différence significative n'a pu être observée sur les concentrations pilaires de Fe entre les deux groupes de porcs, mais la concentration pilaire la plus haute en Fe est obtenue pour le niveau d'apport en Fe le plus bas (HEDGES & KORNEGAY, 1973).

De plus, une étude sur 391 chevaux ne met en évidence aucune corrélation ($p > 0,05$) entre l'apport alimentaire en Fe et en Mg (obtenue par analyse de l'alimentation) et la concentration pilaire de ceux-ci. Pour le Manganèse, une très faible corrélation négative est observée ($p < 0,05$ et $R^2 = 0,011$) (WELLS & RALSTON, 1990).

Ces études sont réalisées sur un nombre important de chevaux et de porcs. Ainsi, si on extrapole ces résultats aux bovins, il ne semble donc pas y avoir de relation entre la quantité d'apport en Fe, Mg et Mn et leur concentration pilaire.

2 - Effet du niveau alimentaire d'un élément minéral sur les concentrations pilaires des autres minéraux

On a vu précédemment que la relation entre la teneur pilaire d'un élément minéral et son apport alimentaire était très souvent controversée. De plus, il existe d'autres facteurs alimentaires qui influencent la concentration pilaire d'un élément.

a - Concentration pilaire en Zinc

Dans une étude incluant soixante porcs recevant pendant neuf semaines différents apports en Cu et en Fe, on observe des concentrations en Zn significativement plus importantes ($p < 0,01$) dans les poils des cochons ayant reçu plus de Fe dans leur alimentation. D'autre part, aucune influence de l'apport alimentaire en Cu n'est notée sur la concentration pilaire de Zn (HEDGES & KORNEGAY, 1973).

Une autre étude, portant sur deux lots de 192 porcs met en évidence que la concentration des poils en Zn est augmentée pour des faibles apports en P (75% apport NRC 1973). Dans cette même étude, les différents régimes en Ca n'affectent pas la concentration pilaire en Zn (KORNEGAY, et al., 1981).

Ainsi, la quantité de Zn pilaire est influencée par les niveaux d'apports alimentaires en Fe et en P, ce qui ne facilite pas l'interprétation d'une analyse pilaire.

b - Concentration pilaire en Cuivre

Chez le porc, si l'apport alimentaire en Cu est important (257ppm), l'augmentation du niveau d'apport alimentaire en Fe (de 101 à 312 ppm) entraîne une hausse significative ($p < 0,01$) de la teneur en Cu du poil (HEDGES & KORNEGAY, 1973).

Une étude réalisée sur neuf bovins de race Hereford montre une concentration pilaire en Cu significativement plus basse avec des régimes riches en Molybdène et Soufre (KELLAWAY, et al., 1978).

La teneur pilaire en Cu semble donc être affectée par les niveaux alimentaires en Fe, Mo et S. Ces relations compliquent d'autant plus la relation controversée qui peut exister entre la concentration pilaire en Cu et son apport alimentaire (COMBS, et al., 1982).

c - Concentration pilaire en Sélénium

Une expérience menée sur soixante rats met en évidence une quantité de Se pilaire presque deux fois supérieure ($p < 0,05$) chez les rats recevant un apport déficient en Méthionine (0,34%) comparé à un apport adéquate en Méthionine (0,60%) (SALBE & LEVANDIER, 1990).

Ainsi, il existe d'autres facteurs alimentaires que la quantité d'apport en Se qui interviennent dans la teneur de celui-ci dans les poils. Notamment on peut supposer qu'en cas de carence alimentaire en Méthionine les informations apportées par le dosage pilaire du Se sur le statut en Se de l'animal sont erronées (SALBE & LEVANDIER, 1990). Il est donc conseillé de prendre des précautions quant à l'interprétation de la concentration pilaire en Se.

d - Concentration pilaire en Fer

Les travaux de COMBS *et al.* sur des rats, montrent que la teneur en Fe des poils est significativement influencée ($p < 0,05$) par le niveau d'apport alimentaire en Zn. En effet, plus l'apport en Zn est bas, plus la quantité de Fe dans les poils est importante (COMBS, et al., 1983).

Ainsi, cette interaction entre le Zn et Fe rend encore plus difficile l'interprétation de la concentration pilaire en Fe.

e - Concentration pilaire en Manganèse

Chez des veaux, la concentration pilaire en Mn obtenue avec un apport alimentaire en Cu élevé (71,1ppm) est significativement plus importante ($p < 0,01$) qu'avec un apport inférieur (2,5 et 10ppm) (O'MARY, et al., 1970).

De plus, une étude menée sur deux lots de 192 porcs, met en évidence une concentration des poils en Mn augmentée lors de faibles apports en P (75% apport NRC 1973) (KORNEGAY, et al., 1981).

La teneur pilaire en Mn est donc affectée non seulement par l'apport alimentaire en Cu mais aussi par l'apport en P.

B - Facteurs de variation dépendant de l'animal prélevé

Les différentes publications traitant de l'analyse minérale des poils font état de plusieurs facteurs de variation liés à l'individu prélevé lui-même. En effet, il apparaît que le contenu minéral des poils est potentiellement influencé par l'âge de l'individu, son sexe, la couleur de son poil et sa race (COMBS, et al., 1982).

1 - L'âge

Dans les publications disponibles, on trouve une influence de l'âge sur les teneurs pilaires en Zn, Cu, Ca, P, Fe, Mg et Mn. Cependant, aucune expérience n'est trouvée sur la relation entre l'âge de l'animal et la concentration pilaire en Se.

a - Zinc

De nombreuses expériences font état d'une variation du Zn pilaire en fonction de l'âge.

Chez les bovins, les poils de génisses de cinq mois contiennent plus de Zn que ceux des vaches à compter de leur première lactation (MILLER, et al., 1965). Seulement, dans cette étude, les génisses et les vaches n'étant pas soumises au même régime alimentaire. Il est donc difficile de conclure sur l'origine de cette différence de concentration entre les deux classes d'âge.

Cette tendance observée sur les vaches est confirmée sur les études menées sur les humains. En effet, une étude menée sur des humains volontaires de sexe masculin montre qu'après une augmentation de la concentration pilaire en Zn (de 105 à 180 ppm) entre 2 et 12 ans, on observe une diminution de cette concentration (de 180 à 125ppm) entre 12 et 80 ans (PETERING, et al., 1971). Une autre expérience réalisée sur trois cent trente-six humains âgés de zéro à seize ans a mis en évidence une augmentation de la concentration pilaire en Zn jusqu'à 8 ans, et ensuite diminution jusqu'à 16 ans (PERRONE, et al., 1996).

Une expérience avec un régime alimentaire constant en fonction de l'âge a été menée sur deux lots de 208 et 98 singes Rhésus. Les résultats mettent en évidence une diminution significative ($p < 0,001$) de la concentration pilaire en Zn avec l'âge des singes (MARRIOTT, et al., 1996).

En revanche, lors d'une expérience menée sur 391 chevaux, la concentration en Zn des poils n'est pas affectée par l'âge des chevaux (WELLS & RALSTON, 1990).

On observe donc, dans la plupart des publications, des fluctuations de la concentration en Zn pilaire selon l'âge non négligeables.

b - Cuivre

Aucune donnée sur la relation entre l'âge de l'animal et la quantité de Cu dans les poils des bovins n'est disponible. Cependant cette relation a été étudiée chez les humains et chez les chevaux.

Chez les humains, les fluctuations sont similaires à celles observées pour le Zn. En effet, la concentration en Cu dans les poils augmente de deux à douze ans (de 13 à 60 ppm), puis diminue de douze ans à quatre-vingt ans (de 60 à 10 ppm) (PETERING, et al., 1971). Chez des enfants, âgés de zéro à seize ans, une étude a mis en évidence une augmentation de la quantité de Cu dans les poils jusqu'à huit ans, et ensuite une diminution jusqu'à 16 ans (PERRONE, et al., 1996).

Chez les chevaux (N=391) la concentration pilaire en Cu augmente significativement ($p < 0,05$) avec l'âge des chevaux (WELLS & RALSTON, 1990).

Ainsi, malgré le manque d'étude sur les bovins, il semblerait que la teneur pilaire en Cu évolue avec l'âge de l'animal.

c - Calcium et Phosphore

Une seule étude portant sur trois cent quatre-vingt-onze chevaux met en évidence des variations de la teneur en Ca et P dans les poils en fonction de l'âge. Les concentrations pilaires en Ca et P augmentent significativement ($p < 0,05$) avec l'âge des chevaux (WELLS & RALSTON, 1990).

Cette unique étude conduit à conclure à une variation non négligeable de la quantité de Ca et P dans les poils, cependant d'autres expériences sont nécessaires afin de pouvoir conclure de façon plus ferme.

d - Fer, Magnésium et Manganèse

Le dosage du Fe, Mg et Mn pileire de chevaux (N=391) a permis de mettre en évidence une augmentation significative ($p < 0,05$) de leurs concentrations pileires avec l'âge des chevaux (WELLS & RALSTON, 1990).

Chez les humains, on observe une forte diminution de la concentration pileire en Fe de zéro à huit ans, puis cette concentration présente peu de changement jusqu'à seize ans (PERRONE, et al., 1996).

Pour finir, des dosages réalisés sur deux lots de deux cent huit et quatre-vingt-dix-huit singes Rhésus ont mis en évidence une diminution ($p < 0,05$) de la concentration pileire en Mn avec l'âge des singes (MARRIOTT, et al., 1996).

De même que pour le Ca et le P, les concentrations en Fe, Mg et Mn semblent être affectées par l'âge de l'animal, mais d'autres études sont nécessaire afin d'explorer cette relation.

L'âge semble donc être responsable de fluctuations non négligeables dans les résultats d'une analyse pileire. Cependant, les animaux des différentes classes d'âge en élevage ne reçoivent pas la même alimentation. Il est donc difficile de faire la différence entre « l'effet changement d'alimentation avec l'âge » et « l'effet âge » proprement dit (COMBS, et al., 1982).

2 - Le sexe

Dans une expérience portant sur cent quatre vingt douze porcs mâles et femelles non stérilisés, une concentration pilaire plus élevée ($p < 0,01$) en Cu est observée chez les mâles (KORNEGAY, et al., 1981).

Contrairement à ce qui est observé chez les porcs, chez les humains âgés de onze à seize ans (51 hommes et 42 femmes), la concentration en Cu dans les poils de femmes est significativement ($p < 0,05$) plus élevée que chez les hommes (PERRONE, et al., 1996).

Enfin, des dosages réalisés sur deux lots de deux cent huit et quatre-vingt-dix-huit singes Rhésus ne mettent en évidence aucune différence dans les quantités de Cu, Zn et Fe dans les poils entre les mâles et les femelles (MARRIOTT, et al., 1996).

Les résultats de ces différentes études ne s'accordent pas. Il est donc difficile de statuer sur une éventuelle influence du sexe de l'individu sur les concentrations pilaires en minéraux.

3 - Couleur du poil

La dépigmentation est un des symptômes décrits de la carence en Cu chez les bovins. Une telle dépigmentation est aussi décrite sur les poils noirs des rats lors de carence en Zn (COMBS, et al., 1982).

On peut donc se demander dans quelles mesures la couleur des poils influence leur contenu en éléments minéraux ?

Différentes publications étudient les éventuelles variations de la quantité de Zn, Cu, Se, Mg, Ca, P, Mn, Fe en fonction de la couleur des poils.

a - Zinc

Chez les bovins de race Prim'holstein, les poils de couleur noire ont une concentration en Zinc plus élevée que les poils de couleur blanche (MILLER, et al., 1965).

D'autre part, cette différence de concentration pilaire n'est pas observée chez les bovins de race Hereford entre les poils rouges et blancs. En effet, les compositions pilaires en Zn ne sont pas significativement différentes entre les poils rouges et les blancs (HALL, et al., 1971; O'MARY, et al., 1969).

Ainsi, la seule variation de concentration du Zn pilaire est observée sur les vaches de race Prim'holstein entre les poils noirs et les poils blancs. Ceci serait lié, selon les auteurs, à une forte teneur en Zinc des tissus mélanisés (MILLER, et al., 1965).

b - Cuivre

Lors de deux études réalisées sur des bovins de race Hereford, aucune différence significative n'est mise en évidence entre les concentrations pilaires en Cu des poils rouges et des poils blancs (HALL, et al., 1971; O'MARY, et al., 1969).

D'après ces données restreintes aux poils rouges et blancs des bovins de race Hereford, le Cu pilaire ne semble donc pas être affecté par la couleur du poil.

c - Sélénium

La concentration pilaire en Se est significativement plus faible ($p < 0,001$) dans les poils blancs que dans les poils noirs chez les bovins de race Prim'holstein. Cette différence est attribuable, selon les auteurs, à la quantité plus faible d'acides aminés soufrés, site de

fixation du Se, composant la mélanine dans les poils blancs (CHRISTODOULOPOULOS, et al., 2003).

Cette unique étude montre une influence non négligeable de la couleur du poil sur sa concentration en Se.

d - Calcium, Phosphore, Magnésium, Fer et Manganèse

Les concentrations pilaires des bovins de race Hereford sont significativement supérieures ($p < 0,05$) dans les poils de couleur rouge pour le Ca, P, Mg, Mn, Fe que dans les poils blancs (HALL, et al., 1971; O'MARY, et al., 1969).

Une autre étude réalisée sur onze vaches de race Angus et treize vaches de race croisée (Angus – Charolais) a mis en évidence une concentration en Mg au moins trois fois supérieure ($p < 0,001$) dans les poils noirs (vaches de race Angus) que dans les poils à pigmentation claire (vaches de race croisée Angus Charolais) (FISHER, et al., 1985).

La compilation de ces résultats semble montrer une influence de la couleur pour tous ces éléments, malgré le faible nombre de données. Ainsi, les concentrations en Ca, P, Mg, Fe et Mn sont plus importantes dans les poils à forte pigmentation (noire, rouge) que dans les poils faiblement pigmentés.

2 - La race

Peu d'études sont disponibles sur l'influence des races de bovins sur la concentration pilaire des minéraux (COMBS, et al., 1982).

Cependant, une étude menée sur dix veaux de race Hereford et neuf veaux de race Holstein soumis au même régime alimentaire pendant cent douze jours nous fournit des

informations sur cette influence. En effet, en comparant les poils blancs de ces deux races, les auteurs ont observé une concentration pilaire significativement plus importante ($p < 0,01$) dans les poils des veaux Holstein pour le Ca, que dans les poils des veaux Hereford. De plus, les poils noirs des veaux Holstein présentent une quantité supérieure ($p < 0,01$) en Ca, P, et Mg que les poils rouges des veaux Hereford (O'MARY, et al., 1970).

Ainsi, le facteur race semble influencer la composition minérale des poils de bovins. Cependant, le manque de données ne nous permet pas d'évaluer l'importance de cette influence. De plus, il ne faut pas oublier que toutes les races de bovins n'ont pas la même couleur de poils. Ainsi, comme on l'a vu précédemment, cette variation seule de couleur inter-raciale peut influencer la quantité de beaucoup d'éléments.

C - Facteurs de variation dépendant du mode de prélèvement

Plusieurs éléments liés au protocole de prélèvement lui-même sont supposés influencer la concentration pilaire des minéraux. La saison de prélèvement, la localisation des poils prélevés et la portion des poils prélevés font partie de ces éléments (COMBS, et al., 1982).

1 - Saison de prélèvement

Deux études réalisées sur des bovins et des poneys révèlent des fluctuations dans les teneurs pilaires des éléments minéraux en fonction des saisons.

Chez les bovins, on observe le Cu, le Ca, le Mg et le Mn en quantité plus importante ($p < 0,01$) dans les poils collectés en août que dans ceux collectés au mois de mars de l'année suivante. A l'inverse, le Fe est présent en quantité plus faible ($p < 0,01$) en août qu'en mars de l'année

suivante. Pour finir, le Zn et le P, aussi dosés, ne présentent aucune différence significative entre les deux saisons de prélèvement (O'MARY, et al., 1969).

Ces variations observées chez les bovins sont confirmées chez les poneys pour le Ca et le P. En effet, aucune variation saisonnière de la concentration pilaire en P n'est observée, et la teneur des poils en Ca diminue en automne et en hiver (de novembre à mars) et augmente au printemps (de avril à mai). Ainsi, la concentration en Ca est plus élevée en été qu'en hiver (WYSOCKI & KLETT, 1971).

Cette augmentation en Ca pilaire serait compatible avec une augmentation de la transpiration, due à la chaleur des mois d'été, et à la fixation du Ca contenu dans les sécrétions des glandes sudoripares sur les molécules de kératine et mélanine composant la trame pilaire (WYSOCKI & KLETT, 1971). En effet, les sécrétions des glandes sudoripares atrichiales, présentes en nombre élevé chez les bovins, contiennent une quantité importante de Ca, P, Cu, Mn et Zn. Cette sécrétion peut varier grandement en fonction des individus, de la localisation sur le corps ainsi que du climat, et donc de la saison, et par conséquent faire varier la teneur pilaire de ces éléments (COMBS, 1987).

Cependant, en situation réelle, de même que pour l'effet « âge de l'individu », les variations saisonnières sont aussi le reflet d'une alimentation non constante aux différentes saisons (COMBS, et al., 1982). Il est donc difficile de différencier l'effet changement alimentaire et l'effet saisonnier propre.

2 - Localisation sur le corps

Une seule étude réalisée sur 17 bovins de race Prim'Holstein est disponible sur l'influence de la localisation du poil sur le corps et sa composition minérale.

Aucune différence entre les compositions des poils issus de l'aire costale et de l'encolure n'est observée. En revanche, les concentrations en Zn des poils prélevés sur les membres tendent à être plus basses que dans ces deux dernières régions, mais pour autant aucune différence significative n'est trouvée entre ces trois régions (MILLER, et al., 1965).

Ainsi, peu d'études sont disponibles sur ce facteur de variation. Cependant, selon MILLER *et al.*(1975), la concentration en minéraux peut être différente en fonction de la localisation sur le corps si l'on prend en considération le fait que les poils situés sur des régions différentes du corps ne sont pas nécessairement au même stade du cycle pilaire (MILLER, et al., 1965). De plus, les sécrétions des glandes sudoripares atrichiales varient grandement suivant la localisation sur le corps, ce qui peut aussi être à l'origine de variation de la teneur pilaire des minéraux (COMBS, 1987).

Il est ainsi conseillé de standardiser le lieu de prélèvement de poils en vue d'analyse pilaire, au moins au sein d'une même série de mesure afin de pouvoir comparer les valeurs obtenues entre elles.

3 - Portion du poil

Lors d'une unique étude réalisée sur 5 bovins, les parties proximales et distales du poil ne présentent pas de différence significative de la concentration pilaire en zinc (MILLER, et al., 1965).

Il ne serait donc pas nécessaire de prendre en compte la longueur à laquelle les poils sont coupés lors du prélèvement. Cependant, lors de cette étude, aucun changement alimentaire n'avait été réalisé dans les mois précédant l'expérimentation, on peut donc penser qu'un changement important des apports alimentaires pourrait induire une différence entre ces deux parties du poil si on considère que la concentration pilaire ne change pas après la formation de la trame pilaire.

D - Facteurs de variation dépendant de l'environnement

Les poils des animaux, de par leur localisation, sont constamment en contact avec le milieu extérieur. Ainsi, en considérant le fait que des éléments minéraux sont présents dans

le milieu extérieur, ce milieu extérieur est une potentielle source de contamination des poils en minéraux.

Des analyses pilaires réalisées sur soixante-sept humains ont montré une corrélation linéaire faible, voire nulle, pour les concentrations en Ca, Mg, Cu, Fe et Zn ($r < 0,4$ pour le Ca et $r < 0,3$ pour les autres) entre les cheveux et les poils pubiens. Ainsi en admettant que les poils pubiens ne sont pas soumis aux mêmes contaminants extérieurs que les cheveux et que ces deux types de poils sont soumis aux mêmes apports en minéraux d'origine endogène (tout du moins en proportion), on peut penser que ces différences de concentration en minéraux sont dues aux contaminations extérieures de la trame pilaire. Les auteurs recommandent donc la plus grande prudence pour ce qui est de l'interprétation de ce type de dosage quant au statut minéral de l'individu (DeANTONIO, et al., 1982).

De plus, à la faveur d'une expérimentation sur trois troupeaux de bovin, NOUGUES et LAMAND ont observé une teneur en Zn anormalement haute dans un des trois troupeaux. Dans ce troupeau, on a constaté la présence de cornadis galvanisés contre lesquels les vaches peuvent se frotter. Les auteurs ont donc conclu que du Zn provenant de ces cornadis galvanisés (riche en Zn) s'est fixé sur le poil, et par conséquent contamine les échantillons (NOUGUES & LAMAND, 1972).

Cette contamination en Zn des poils à partir de tubes galvanisés est retrouvée lors d'une étude réalisée sur des singes. En effet, une étude effectuée sur deux lots de deux cent huit et quatre-vingt-dix-huit singes Rhésus a mis en évidence une concentration en Zn dans les poils très supérieure ($p < 0,001$) dans le lot de quatre-vingt-dix-huit singes (8017nmol/g de moyenne contre 2433nmol/g dans le lot de deux cent huit singes). Les niveaux alimentaires ne présentant pas une différence telle pour expliquer cette différence (145ppm pour le lot de 98 singes contre 171ppm pour le lot de 208 singes). Les auteurs attribuent donc cette différence aux conditions de vie des singes. En effet, dans le lot de quatre-vingt-dix-huit singes, les animaux sont en captivité dans des cages en métal galvanisé. Ces cages seraient à l'origine, par contact et par ingestion (léchage), de l'augmentation importante de Zn dans les poils des singes de ce lot (MARRIOTT, et al., 1996).

Selon LAMAND M. (1987), le poil se comporte tel une résine échangeuse d'ions et capte ainsi fortement les contaminants présents dans l'environnement et ne les restitue pas au lavage. Ainsi les poils peuvent aisément s'enrichir en éléments minéraux présents dans l'environnement, comme c'est le cas avec le Zn contenu dans les barrières en tube galvanisé (LAMAND, 1987). De plus, l'excrétion intestinale représente la plus grande voie d'excrétion du Zn et du Cu endogène des bovins. On retrouve ainsi du Zn et du Cu dans les matières fécales, susceptibles de souiller les poils et donc de modifier la concentration pilaire en Zn et en Cu (MESCHY, 2010; MILLER, 1970).

Les contaminations extérieures sont donc responsables d'une part non négligeable de la variation de la composition minérale des poils, notamment pour le Zn avec les tubes et les cornadis galvanisés très présents en élevage bovin (*cf Photo 1*).



Photo 1 : Tubes et cornadis galvanisés présents en abondance dans les élevages bovins (Jourdain, 2013)

IV – Conclusion sur les informations apportées par l’analyse minérale des poils

Le poil présente plusieurs propriétés avantageuses qui en font un potentiel tissu de choix à prélever en vue d’une analyse minérale.

En effet, la collecte est très facile, réalisable par l’éleveur lui-même, le prélèvement est atraumatique et ne nécessite pas de matériel particulier. Un échantillon très réduit de poils (quelques grammes) permet de doser de nombreux éléments (Ca, Mg, P, Cu, Zn, Se, Mn, Fe, K, Na, S, Co, Si, Al...) Les poils présentent aussi la possibilité d’être stockés en attendant l’analyse grâce à leur grande stabilité dans le temps (COMBS, et al., 1982).

De plus, les auteurs avancent le fait que l’analyse pilaire fournit des informations sur une longue période (COMBS, et al., 1982; KELLAWAY, et al., 1978).

Pour finir, le coût d’une telle analyse de poils est moindre pour plusieurs raisons. D’une part on peut doser de nombreux éléments en même temps sur un échantillon réduit grâce aux nouvelles techniques de dosage comme l’ICP-MS. D’autre part, l’éleveur économise le coût du prélèvement, et les poils étant un prélèvement stable dans le temps ils ne nécessitent pas un envoi postal particulier et onéreux (contrairement au sang).

Les utilisations que l’on peut faire du dosage des minéraux dans les poils sont résumées par les facteurs de variation vus au chapitre précédent qui sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous : *Tableau 2, Tableau 3 et Tableau 4.*

Tableau 2 : Apports du dosage pilaire en Zn, Cu et Se : Facteurs de variation de leur concentration pilaire (*n* : nombre de publications)

Facteurs de variation	Alimentation	Individu	Saison	Contamination extérieure
Zinc	Pas de relation nette entre l'alimentation en Zn et sa concentration pilaire (n=8)	x L'âge semble affecter le Zn pilaire x Les poils fortement pigmentés (noirs) contiennent plus de Zn que les poils très faiblement pigmentés (blancs) (n=1)	Aucune variation saisonnière n'est observée (n=1)	Les poils sont fortement sujets à la contamination extérieure en Zn, notamment par l'intermédiaire des tubes galvanisés et des matières fécales (n=3)
	La concentration pilaire en Zn est affectée par les apports en P et en Fe (n=2)			
Cu	Une relation entre l'apport en Cu et sa concentration pilaire semble exister, mais est controversée (n=6)	x L'influence de l'âge n'a pas été étudiée chez les bovins. Il influence la teneur pilaire en Cu chez les chevaux x Le Cu pilaire n'est pas affecté par la couleur des poils (n=2)	Le Cu semble être présent en quantité plus importante dans les poils en été qu'en hiver (n=1)	<i>Pas de publication disponible sur une éventuelle contamination en Cu des poils de bovins</i>
	La quantité de Cu dans les poils est affectée par les apports en Mo et en S, et semble l'être aussi par les apports en Fe (n=2)			
Se	La quantité et la forme chimique des apports en Se semblent influencer la concentration pilaire en Se (n=3) De plus une corrélation entre quantité de Se dans les poils et probabilité de contracter une myopathie-dyspnée est établie	x Il y a plus de Se dans les poils noirs que dans les poils blancs des bovins (n=1)	<i>Pas de publication disponible sur une éventuelle variation saisonnière</i>	<i>Pas de publication disponible sur une éventuelle contamination en Se des poils de bovins</i>
	La teneur en Se pilaire est affectée par les apports en Méthionine (n=1)			

Tableau 3 : Apports du dosage pilaire en Ca, P et Fe : Facteurs de variation de leur concentration pilaire (*n* : nombre de publications)

Facteurs de variation	Alimentation	Individu	Saison	Contamination extérieure
Calcium	Le Ca pilaire ne reflète pas les apports alimentaires en Ca (n=3)	<ul style="list-style-type: none"> x La quantité de Ca augmente avec l'âge chez les chevaux (n=1) x La teneur en Ca est augmentée dans les poils à forte pigmentation (n=2) 	Le Ca semble être présent en quantité plus importante dans les poils en été qu'en hiver (n=2)	<i>Pas de publication disponible sur une éventuelle contamination en Ca des poils de bovins</i>
Phosphore	La quantité en P n'est pas significativement affectée par les apports alimentaires en P (n=4)	<ul style="list-style-type: none"> x La quantité de P augmente avec l'âge chez les chevaux (n=1) x La teneur en P semble plus élevée dans les poils à forte pigmentation (n=1) 	Le P pilaire n'est pas affecté par la saison de prélèvement (n=2)	<i>Pas de publication disponible sur une éventuelle contamination en P des poils de bovins</i>
Fer	Il ne semble pas exister de variation de la concentration pilaire en Fe due aux apports alimentaires en Fe (n=2)	<ul style="list-style-type: none"> x Pas de publication disponible chez les bovins, mais chez les autres espèces, l'âge semble affecter la concentration pilaire en Fe (n=2) 	<i>Pas de publication disponible sur une éventuelle variation saisonnière</i>	<i>Pas de publication disponible sur une éventuelle contamination en Fe des poils de bovins</i>
	La teneur en Fe pilaire est affectée par les apports en Zn (n=1)	<ul style="list-style-type: none"> x La teneur en Fe semble plus élevée dans les poils à forte pigmentation (n=1) 		

Tableau 4 : Apports du dosage pilaire en Mg et Mn : Facteurs de variation de leur concentration pilaire (*n* : nombre de publications)

Facteurs de variation	Alimentation	Individu	Saison	Contamination extérieure
Magnésium	Il ne semble pas exister de variation de la concentration pilaire en Mg due aux apports alimentaires en Mg (n=1)	<p>x Pas de publication disponible chez les bovins, mais chez les autres espèces, l'âge semble affecter la concentration pilaire en Mg (n=1)</p> <p>x La teneur en Mg est augmentée dans les poils à forte pigmentation (n=2)</p>	Le Mg semble être présent en quantité plus importante dans les poils en été qu'en hiver (n=1)	<i>Pas de publication disponible sur une éventuelle contamination en Mg des poils de bovins</i>
Manganèse	<p>Il ne semble pas exister de variation de la concentration pilaire en Mn due aux apports alimentaires en Mn (n=1)</p> <p>La concentration pilaire en Mn est affectée par les apports alimentaires en Cu et en P (n=2)</p>	<p>x Pas de publication disponible chez les bovins, mais chez les autres espèces, l'âge semble affecter la concentration pilaire en Mn (n=1)</p> <p>x La teneur en Mn est augmentée dans les poils à forte pigmentation (n=2)</p>	Le Mn semble être présent en quantité plus importante dans les poils en été qu'en hiver (n=1)	<i>Pas de publication disponible sur une éventuelle contamination en Mn des poils de bovins</i>

Malgré le fait que la contamination en minéraux des poils ne soit prouvée que pour le Zn, si l'on considère comme LAMAND M. que le poil se comporte comme une résine échangeuse d'ions, tous les minéraux peuvent être soumis aux contaminations extérieures à partir du moment où ils sont présents dans le milieu extérieur des bovins (LAMAND, 1987).

Ainsi, les différentes publications révèlent des relations entre les apports alimentaires en minéraux et leurs concentrations pilaires faibles, voire nulles, pour la plupart des éléments. De plus, l'interprétation des résultats obtenus par une analyse pilaire est compliquée par les différents facteurs de variation du contenu minéral des poils. En effet, on a vu que le niveau d'apport en certains éléments minéraux modifiait la concentration d'autres minéraux dans les poils. L'âge, la couleur des poils, les localisations des poils sur le corps et les contaminations extérieures sont aussi sources de variation du contenu minéral des poils.

Il est donc très difficile d'interpréter les résultats d'une analyse minérale des poils de bovins.

Dans la suite de cette thèse, nous allons nous intéresser plus particulièrement à l'intérêt du dosage du zinc, cuivre et sélénium dans les poils. Pour cela, nous avons réalisé une étude expérimentale sur des bovins.

DEUXIEME PARTIE :

ETUDE EXPERIMENTALE SUR 30

ELEVAGES ALLAITANTS CHAROLAIS

Beaucoup d'analyses pilaires pour les minéraux sont effectuées au sein des élevages. Cependant, aux vues des conclusions très contradictoires des données bibliographiques, il est encore difficile d'apprécier et d'interpréter les résultats obtenus par de telles analyses.

L'objectif de notre étude est d'évaluer si le dosage des oligoéléments dans les poils de bovins permet de déterminer le statut nutritionnel des bovins pour les oligoéléments les plus communs et si la teneur en oligoéléments dans les poils fournit une information sur l'apport alimentaire en oligoéléments des bovins.

Cette étude se limite aux trois oligoéléments que sont le Cuivre, le Sélénium et le Zinc.

I - Matériel et méthode

A - Choix des élevages et des bovins prélevés :

Dans le système d'élevage allaitant, contrairement aux élevages laitiers, les bovins ne reçoivent pas régulièrement des aliments minéraux dans leur ration. En particulier, durant la période de pâturage qui s'étend sur 7 à 8 mois de l'année les bovins ne reçoivent pas ou peu d'aliment minéral. Or, en moyenne les fourrages et l'herbe ne contiennent, entre autres éléments, pas suffisamment de Cu, Zn et Se pour assurer les besoins alimentaires des bovins.

En effet, selon BEGUIN et al. (2001), respectivement 96% et 90% des pâturages français sont déficients en Cu et Zn (BEGUIN, et al., 2001). De plus, une étude réalisée en partie dans le département de l'Allier (03), montre que 100% des foins prélevés dans ce département sont déficients en Zn, Cu et Se (PERIAUD, et al., 1972).

Cette situation favorise les carences en oligoéléments. Ces carences peuvent être responsables de troubles majeurs sur la santé et la croissance du veau, ce qui représente des pertes financières pour l'élevage. Il est donc très intéressant de connaître le statut nutritionnel en oligoéléments des élevages allaitants pour remédier à d'éventuelles carences et adapter les pratiques de complémentation en oligoélément le cas échéant.

Nous avons ainsi choisi de travailler dans une zone d'élevage allaitant et plus particulièrement en zone charolaise, ce qui nous permet de prélever exclusivement des bovins charolais, race entièrement blanche. On s'affranchit alors de certains facteurs de variations de la teneur en oligoéléments dans les poils comme la couleur du poil et la race de l'animal.

Les élevages prélevés pour cette étude sont des élevages de bovins allaitants de race charolaise situés dans la clientèle du cabinet vétérinaire de Saint Désiré (SCP Chantreaux-Thiercy) à cheval sur les départements de l'Allier (03) et du Cher (18) (cf Figure 7 et Figure 8).



Figure 7 : Localisation de Saint Désiré dans le département de l'allier (03)

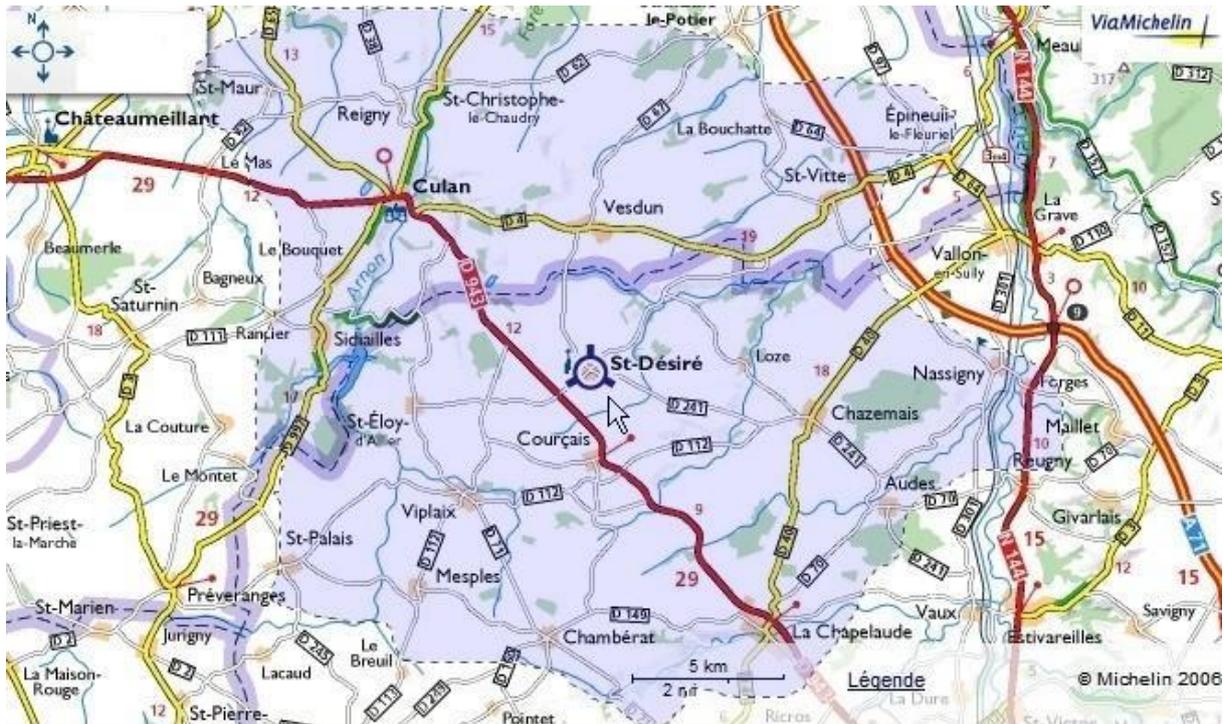


Figure 8 : Délimitation géographique de la clientèle de la clinique vétérinaire de Saint-Désiré (SCP Chantreau-Thiercy)

Les élevages ont été sélectionnés au sein de la clientèle afin de représenter, autant que possible, différents niveaux de complémentation minérale de la ration. Cette sélection a priori a été effectuée grâce à la connaissance des pratiques alimentaires des élevages de la part de leur vétérinaire traitant.

Au sein de chaque élevage, dix bovins femelles de plus de deux ans en bonne santé apparente, soumis au même régime alimentaire, notamment pour ce qui est de la complémentation en oligoéléments, sont prélevés pour l'étude. De plus conformément aux recommandations des laboratoires, les vaches dans le dernier mois de gestation et les 15 premiers jours de lactation ne sont pas admises dans cette étude.

B - Prélèvement et collecte d'information :

Dans chaque élevage, des prélèvements de poils et de sang sont effectués sur chacune des 10 vaches. Les prélèvements ont été réalisés entre le 3 Mars 2012 et le 27 Mars 2012. Soit au minimum 3 mois après la rentrée à l'étable, et donc après 3 mois d'alimentation minérale stable.

Le prélèvement de sang est réalisé à la veine jugulaire externe à l'aide d'une aiguille à usage unique (14Gx2-1/2" ; 2,00x60mm) et d'un tube Monovet® d'héparine de Lithium de 7,5mL (*cf Photo 2*). Une aiguille de gros calibre est utilisée afin d'éviter au maximum une hémolyse du prélèvement ce qui fausserait la teneur en Zn du plasma (LAMAND, 1987). Les prélèvements sanguins sont identifiés puis conservés et acheminés aux laboratoires (sous 96h maximum) sous couvert de froid positif.



Photo 2 : Prélèvement de sang dans la veine jugulaire externe

Les échantillons de poils sont prélevés au niveau de la base caudale du chignon (*cf Photo 3*). Les poils sont coupés à ras avec une paire de ciseaux puis stockés dans une enveloppe papier en prenant soin de ne pas utiliser de ruban adhésif (conformément aux

recommandations du laboratoire). L'analyse pilaire étant une analyse de troupeau, il est ensuite réalisé un mélange de poils avec les 10 échantillons prélevés. Ce mélange est constitué de 1g de poils de chacune des 10 vaches prélevées, pesé avec une balance de précision de référence : Adventurer Pro AV213 (de OHAUS Corporation, Pine Brooj, NJ, USA). Le mélange de chaque élevage est ensuite conditionné dans une enveloppe papier puis expédié pour analyse au laboratoire.



Photo 3 : Prélèvement de poil à la base caudale du chignon

Des données sont aussi recueillies auprès de l'éleveur sur l'alimentation, sur l'identification des animaux et le logement des animaux. Une attention toute particulière est portée sur le recueil des données concernant la complémentation minéral, c'est-à-dire la quantité exacte de complément distribué par jour à chaque bovin et le relevé de la composition des aliments minéraux (étiquettes du fabricant). Il est de plus noté avec soin si les bovins reçoivent une cure en oligoélément lors de la rentrée à l'étable, et le cas échéant les détails concernant celle-ci sont relevés. En effet, il est devenu habituel dans bon nombre d'élevage allaitant de « recharger » l'organisme des bovins à l'aide d'une supplémentation élevée en oligoéléments sur 5 à 10 jours (*cf Tableau 5*). Cette pratique a pour but de minimiser la carence éventuelle en oligoéléments provoquée par le déficit d'apport d'aliments minéraux pendant la période de pâturage.

Tableau 5 : Composition de la cure en oligoélément la plus répandue au sein des élevages prélevés (les chiffres entre parenthèse sont les rapports de l'apport quotidien réalisé lors de la cure par rapport à l'apport quotidien recommandé par l'INRA (MESCHY, 2007))

		Zn	Cu	Se
Apport total reçu sur 5 ou 10 jours (en mg)		9500	12500	500
Apport quotidien en mg/KgMS	Sur 5 jours :	190 (x3,8)	250 (x25)	10 (x100)
	Sur 10 jours :	95 (x1,9)	125 (x12,5)	5 (x50)

C - Le dosage des oligoéléments :

1 - Dans les poils :

Le dosage du Zn, Cu et Se sont effectués dans le laboratoire PROTEC SEROM (analyse Capi-Métallogramme) situé à Fondettes dans le département de l'Indre-et-Loir (37). L'échantillon de poils reçu par le laboratoire est dans un premier temps lavé. Ensuite, après un séchage, l'échantillon de poils est minéralisé par voie humide. Enfin, les dosages sont effectués par spectrométrie d'émission optique au plasma à couplage inductif.

Les résultats du dosage de poils sur le lot de dix vaches, nous fournissent à la fois une valeur chiffrée de la concentration en Cu, Zn et Se dans les poils des bovins, mais aussi nous indiquent, grâce aux normes fournies par le laboratoire, le statut en oligoélément du lot de bovin pour chaque élément. Ces statuts sont définis de la manière suivante pour chacun des oligoéléments :

***Statut Déficient** : Les bovins nécessitent d'être complémentés significativement en cet élément.

***Statut Marginal** : Les bovins peuvent être plus complémentés en cet élément.

***Statut Adéquat** : Les bovins ne nécessitent aucune autre complémentation pour cet élément.

2 - Dans le sang :

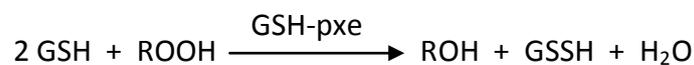
Les dosages dans le sang du Cu et du Zn d'une part et du Se d'autre part ne sont pas réalisés dans le même laboratoire. Dans un premier temps, les échantillons de sang sont tous transmis au laboratoire IODOLAB situé à Marcy l'Etoile dans le département du Rhône (69) afin de réaliser le dosage du Se. Ce premier laboratoire expédie ensuite les plasmas au Laboratoire d'alimentation de l'Ecole Nationale Vétérinaire Toulouse pour le dosage de Zn et Cu.

a - Le Sélénium

Le sélénium n'est pas dosé en tant que tel. En effet, dans cette étude, l'évaluation du statut nutritionnel en sélénium est réalisée à partir d'une mesure d'activité enzymatique, l'activité de la glutathion-peroxydase érythrocytaire (GSH-pxe). La GSH-pxe, qui joue un rôle important dans les réactions anti-oxydante de l'organisme, est une enzyme séléno-dépendante pour laquelle une méthode de mesure de l'activité a été développée (PAGLIA & VALENTINE, 1967).

Le principe de la mesure de l'activité de la GSH-pxe est le suivant :

La glutathion peroxydase est une enzyme catalysant l'oxydation du glutathion (GSH) via l'hypéroxyde de cumène (ROOH) selon la réaction suivante :



En présence de la glutathion réductase (GR) et de (NADPH, H⁺), le glutathion oxydé (GSSH) est immédiatement réduit selon la réaction suivante :



A 340 nm, on peut mesurer une diminution d'absorbance du NADPH, et ainsi mesurer sa vitesse de disparition. En accord avec les réactions présentées ci-dessus, cette vitesse de disparition est proportionnelle à la formation de GSSG et donc à l'activité de la glutathion

peroxydase érythrocytaire. La mesure de cette activité enzymatique est donc réalisée par colorimétrie.

La mesure de cette activité enzymatique réalisée dans cette étude est donc une mesure fonctionnelle du statut nutritionnel en Se. En effet, une carence en Se implique une diminution de l'activité de la GSH-pxe, ce qui correspond à un dysfonctionnement cellulaire au niveau des réactions anti-oxydantes.

b - Le Cuivre et le Zinc

Contrairement à la méthode utilisée pour mesurer le Se, une méthode directe est utilisée afin de mesurer le Zn et le Cu.

Après précipitation des protéines du plasma par de l'acide chlorhydrique, le Zn et le Cu sont dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique.

D - Traitement des données :

1 - Classement des élevages en fonction de leur niveau de complémentation en oligoélément :

L'étude des données concernant la complémentation alimentaire en oligoélément recueillies dans chacun des 30 élevages a permis le calcul des apports quotidiens en oligoéléments des bovins, et ainsi le classement des élevages en 3 groupes en fonction de leur niveau de complémentation en oligoéléments (complémentation faible, marginale et importante).

Les apports quotidiens sont calculés en ne tenant compte que des quantités de Zn, Cu et Se apportées par l'aliment minéral de la ration (qu'il soit distribué à part ou bien incorporé dans un complément alimentaire du commerce). Afin de ramener cette quantité d'oligoéléments

au kg de matière sèche ingérée, on a considéré que la capacité d'ingestion d'une vache dans le dernier tiers de gestation est de 10kgMS et de 12kgMS pour une vache en lactation.

Outre les apports quotidiens en oligoéléments, la réalisation ou non d'une cure de chargement en oligoéléments (similaire ou équivalente à celle exposée dans le *Tableau 5*) est prise en compte pour réaliser ce classement.

Les 3 niveaux de complémentation en Zn, Cu et Se sont définis comme suit pour chacun de ces éléments :

***Complémentation faible** : Les apports quotidiens en oligoéléments sont en dessous des apports recommandés et aucune cure de chargement en oligoéléments n'est réalisée.

***Complémentation intermédiaire** : Les apports quotidiens en oligoéléments sont en accord avec les apports recommandés ou les apports quotidiens en oligoéléments sont en dessous des apports recommandés mais une cure d'oligoéléments est effectuée à la rentrée de pâturage.

***Complémentation importante** : les apports quotidiens en oligoéléments sont en accord avec les apports recommandés et une cure d'oligoéléments est effectuée à la rentrée de pâturage.

Les apports recommandés pris en compte sont ceux publiés par l'INRA (MESCHY, 2007) (*cf Tableau 6*).

Tableau 6 : Apports quotidiens recommandés par l'INRA en Cu, Se et Zn (MESCHY, 2007)

	Cuivre	Sélénium	Zinc
Apports quotidiens recommandés	10 mg/kgMS	0,1 mg/kgMS	50 mg/kgMS

2 - Classement des élevages en fonction de leur concentration sanguine en oligoélément :

Un statut nutritionnel en oligoélément est également défini à partir de l'analyse des valeurs fournies par le dosage des oligoéléments dans le sang. En effet, ENJALBERT et al. (2006) proposent une méthode qui a été utilisée dans cette étude afin de déterminer un statut nutritionnel en Zn, Cu et Se à partir du dosage sanguin de ces éléments.

Cette méthode consiste à calculer pour chaque élément le premier tercile des valeurs individuelles obtenues dans chaque élevage. Ensuite, en comparant le premier tercile de chaque élevage aux valeurs usuelles, on obtient le statut nutritionnel de l'élevage pour chaque élément (*cf* *Tableau 7*). Ces valeurs usuelles ont été établies par une analyse de risque quant à la survenue de troubles liés à la carence en Zn, Cu et Se lors d'une étude rétrospective sur 2080 élevages (ENJALBERT, et al., 2006).

Tableau 7 : Valeurs usuelles permettant l'obtention du statut nutritionnel en oligoélément d'un élevage selon le premier tercile des concentrations individuelles (ENJALBERT, et al., 2006)

Statut nutritionnel	Déficient	Marginal	Adéquate
Cuivre plasmatique ($\mu\text{mol/L}$)	< 8	8 ; 11	> 11
Zinc plasmatique ($\mu\text{mol/L}$)	< 12	12 ; 14	> 14
activité de la GSH-Pxe (U/gHb)	< 75	75 ; 150	> 150

Pour le calcul des premiers terciles des concentrations sanguines individuelles, certaines valeurs individuelles « aberrantes » ont été écartées. Premièrement, les valeurs obtenues sur les échantillons hémolysés ou coagulés ont été écartées (8 sur les 300 valeurs individuelles) car l'hémolyse du sang et la coagulation faussent les concentrations plasmatiques en Zn et Cu (LAMAND, 1987). De plus, une réaction inflammatoire ou une infection peuvent entraîner une augmentation importante de la valeur du cuivre plasmatique et une diminution significative de la valeur du zinc plasmatique. Ainsi, les vaches ayant une valeur de cuivre plasmatique supérieure à 18 $\mu\text{mol/L}$ couplés avec une

valeur de zinc plasmatique inférieure à 10 $\mu\text{mol/L}$ (1 seule vache sur les 300 prélevées) ont ainsi été écartées de l'étude (ENJALBERT, et al., 2006; UNDERWOOD & SUTTLE, 1999; LAMAND, 1987).

Après avoir écarté ces valeurs « aberrantes », dans cette étude, les terciles sont calculés sur 8 à 10 valeurs individuelles selon les élevages. Ceci est en accord avec ENJALBERT et al. (2006) qui utilisent dans leur méthode le calcul de ce tercile sur minimum 3 valeurs individuelles, et sur 5 valeurs en moyenne (ENJALBERT, et al., 2006).

3 - Comparaison statistique des différentes données obtenues :

Dans un premier temps, les résultats obtenus dans cette étude sont statistiquement comparés grâce au test non paramétrique de Kruskal-wallis (>2 distributions) et de Mann-Whitney-Wylcoxon (2 distributions) de comparaison des moyennes.

Ensuite, des coefficients de concordance de Kappa pondéré (K) ont été calculés, ce qui permet d'évaluer la concordance des différentes méthodes de détermination du statut nutritionnel en oligoélément (SIM & WRIGHT, 2005).

Pour finir, des coefficients de corrélation de Spearman sont calculés pour étudier la relation entre les concentrations pilaires et les concentrations sanguines.

Les coefficients de concordance de Kappa sont calculés à l'aide du logiciel Microsoft Office Excel 2007. Tous les autres tests ainsi que le calcul des descripteurs statistiques (moyennes, écarts types, médianes) sont réalisés à l'aide du logiciel R version 2.15.0.

II - Résultats

A - Comparaison entre la concentration pilaire et la complémentation alimentaire en oligoélément :

1 - Zinc :

Les teneurs en zinc dans les poils en fonction des niveaux de complémentation en zinc des élevages sont présentées dans les *Figure 9*, *Tableau 8* et *Tableau 9*.

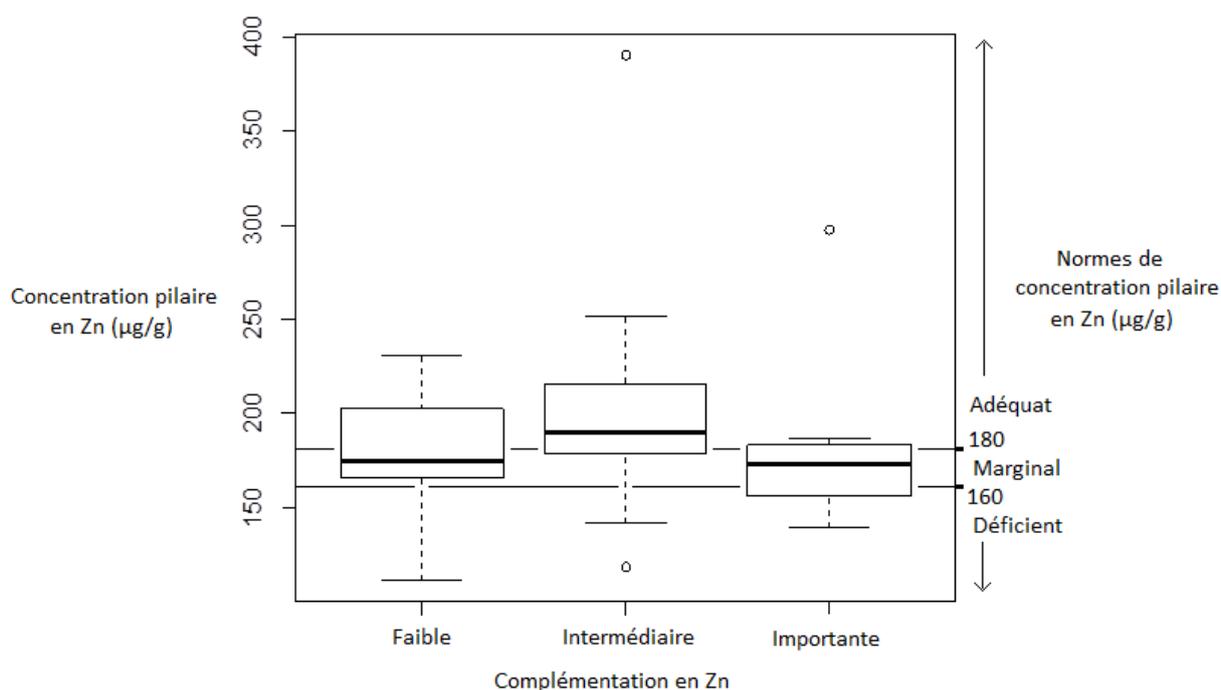


Figure 9 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pilaires en Zn des élevages en fonction de leur complémentation en Zn

Tableau 8 : Concentration pilaire en Zn des élevages en fonction de la pratique de complémentation en Zn (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))

Complémentation en Zn	Concentration pilaire en Zn ($\mu\text{g/g}$)					Nombre d'élevage
	Moyenne	Ecart type	25%	Médiane	75%	
Faible	179,10 ^a	38,05	165,90	174,90	202,70	7
Intermédiaire	201,10 ^a	59,44	179,20	189,80	215,00	16
Importante	184,00 ^a	52,74	156,40	173,00	182,90	7

L'observation des distributions des concentrations pilaires en Zn des élevages en fonction de leur pratique de complémentation en Zn montre un regroupement étroit des trois médianes. De plus, pour chaque pratique de complémentation, plus de 50 % des concentrations pilaires en Zn obtenues sont contenues dans l'intervalle de distribution des concentrations obtenues pour les deux autres groupes (*cf Figure 9 et Tableau 8*). Statistiquement, aucune différence entre les concentrations pilaires en Zn obtenues pour les différentes complémentations n'est mise en évidence ($p=0,34$).

Tableau 9 : Table de contingence décrivant la répartition des pratiques de complémentation et des statuts en Zn observées sur 30 élevages

Complémentation en Zn	Statut en Zn obtenu par analyse pilaire			Total
	Déficient	Marginal	Adéquat	
Faible	1	3	3	7
Intermédiaire	3	2	11	16
Importante	2	3	2	7
Total	6	8	16	30

Seulement 5 élevages sur les 30 présentent des résultats concordants avec les deux méthodes d'évaluation du statut en Zn (*cf Tableau 9*). Ainsi, la concordance statistique est « très mauvaise » ($K= -0,17$) entre ces deux méthodes.

Il n'y a donc aucune concordance entre les informations fournies par la teneur des poils en Zn et les complémentations alimentaires en Zn réalisés sur les bovins.

2 - Cuivre :

Les concentrations pilaires en Cu en fonction du niveau de complémentation en Cu des élevages sont présentés ci-dessous dans les *Figure 10*, *Tableau 10* et *Tableau 11*.

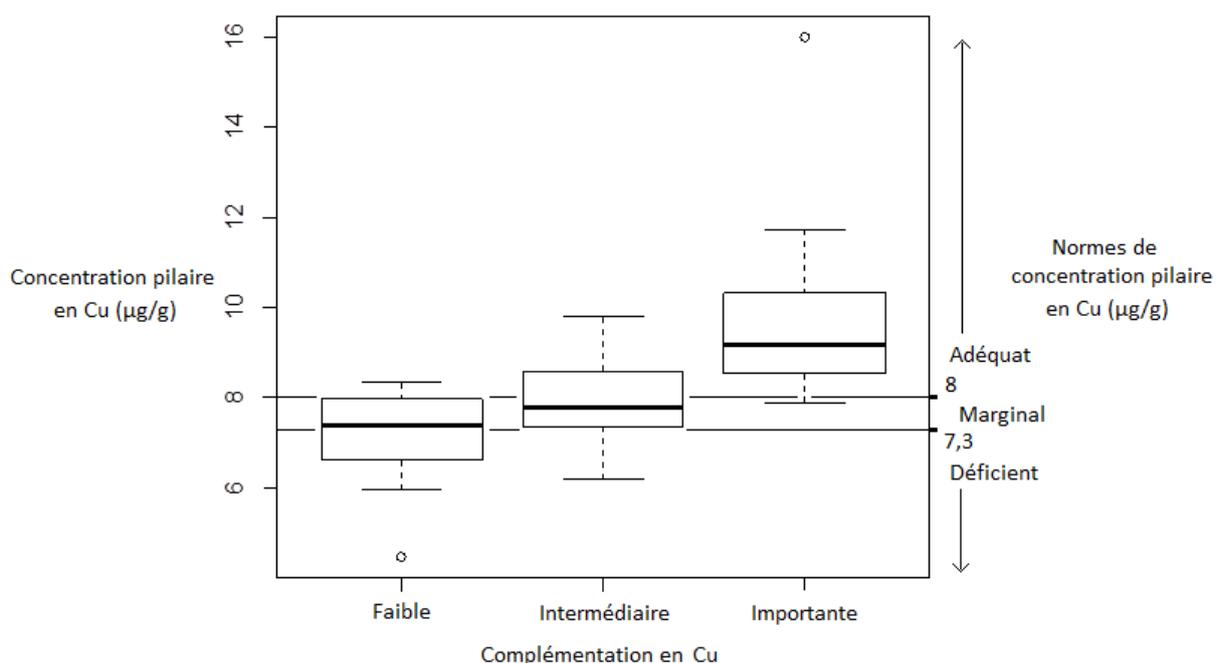


Figure 10 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pilaires en Cu des élevages en fonction leur complémentation en Cu

Tableau 10 : Concentration pilaire en Cu des élevages en fonction du niveau de complémentation en Cu (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p > 0,05$))

Complémentation en Cu	Concentration pilaire en Cu ($\mu\text{g/g}$)					Nombre d'élevage
	Moyenne	Ecart type	25%	Médiane	75%	
Faible	7,05 ^a	1,38	6,63	7,39	7,96	7
Intermédiaire	7,90 ^a	0,90	7,41	7,78	8,50	14
Importante	10,03 ^b	2,54	8,53	9,16	10,33	9

Les distributions des concentrations pilaires en Cu obtenues pour chaque niveau de complémentation alimentaire présentent des plages de recoupement moins importantes que celles observées avec le Zn (*cf Figure 10*). De plus, les médianes des concentrations

pilaires obtenues pour chaque pratique de complémentation sont croissantes avec l'augmentation de la quantité de complémentation en Cu apportée aux bovins (cf *Tableau 10*). Ceci est confirmé statistiquement par une différence significative globale entre les trois distributions ($p < 0,01$). Cependant, si la concentration pilaire en Cu est significativement plus grande ($p < 0,01$) pour les élevages à complémentation importante que pour les élevages à complémentation moindre, les élevages à complémentation faible et intermédiaire ne présentent pas des concentrations pilaires en Cu statistiquement différentes ($p > 0,05$).

Tableau 11 : Table de contingence décrivant la répartition des pratiques de complémentation et des statuts en Cu observées sur 30 élevages

Complémentation en Cu	Statut en Cu obtenu par analyse pilaire			Total
	Déficient	Marginal	Adéquat	
Faible	3	2	2	7
Intermédiaire	3	6	5	14
Importante	0	2	7	9
Total	6	10	14	30

Pour seize élevages, soit plus de 50% des élevages testés, des résultats concordants sont obtenus avec l'analyse pilaire et le niveau de la complémentation en Cu (cf *Tableau 11*). Le coefficient de Kappa révèle une concordance « passable » ($K=0,35$) entre les deux méthodes.

Il apparaît donc que la mesure de la concentration pilaire en Cu permet d'identifier les élevages apportant une complémentation importante aux bovins par rapport aux élevages apportant une quantité moindre de Cu. Mais, bien qu'il existe une concordance entre les données obtenues par l'analyse pilaire et les apports alimentaires en Cu réalisés aux vaches, cette concordance reste faible.

3 - Sélénium :

Les teneurs en sélénium dans les poils en fonction du niveau de complémentation en sélénium des élevages sont présentés ci-dessous dans les *Figure 11*, *Tableau 12* et *Tableau 13*.

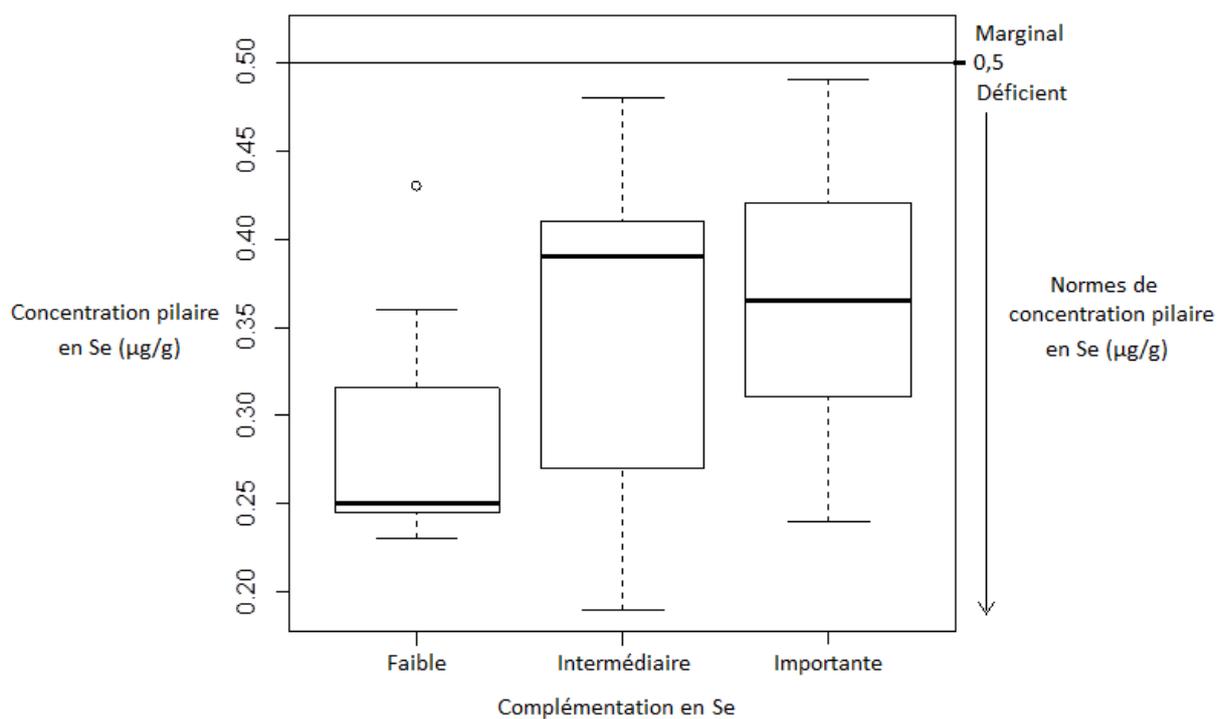


Figure 11 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pilaires en Se des élevages en fonction de leur complémentation en Se

Tableau 12 : Concentration pilaire en Se des élevages en fonction de leur niveau de complémentation en Se (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))

Complémentation en Se	Concentration pilaire en Se ($\mu\text{g/g}$)					Nombre d'élevage
	Moyenne	Ecart type	25%	Médiane	75%	
Faible	0,290 ^a	0,075	0,245	0,250	0,315	7
Intermédiaire	0,360 ^a	0,100	0,270	0,390	0,410	13
Importante	0,360 ^a	0,079	0,310	0,360	0,410	10

Premièrement, quel que soit le niveau d'apport en Se réalisé aux bovins, les teneurs en Se dans les poils obtenues sont très faibles, et se situent toutes en dessous du seuil de déficience fourni par le laboratoire (0,50 µg/g). De plus, les distributions des concentrations pilaires en Se pour les différents niveaux de complémentation se recourent très largement. En effet, les répartitions des teneurs en Se dans les poils des élevages à complémentation « faible » et « importante » sont à plus de 75% comprises dans l'intervalle de distribution des élevages à complémentation « intermédiaire » (cf *Figure 11 et Tableau 12*). Statistiquement, aucune différence significative ($p=0,21$) entre les niveaux de complémentation n'est mise en évidence sur les concentrations pilaires en Se.

Tableau 13 : Table de contingence décrivant la répartition des niveaux de complémentation et des statuts en Se observés sur 30 élevages

Complémentation en Se	Statut en Se obtenu par analyse pilaire			Total
	Déficient	Marginal	Adéquat	
Faible	7	0	0	7
Intermédiaire	13	0	0	13
Importante	10	0	0	10
Total	30	0	0	30

La concordance statistique entre les deux méthodes de détermination du statut en Se de l'élevage est « mauvaise » ($K=0$). En effet, la totalité des élevages sont classés comme déficients par l'analyse pilaire malgré la diversité des niveaux de complémentation en Se (cf *Tableau 13*). Ceci laisse supposer que le seuil de déficience de 0,5µg/g de poil est trop élevé. Cependant le recouplement des distributions des concentrations pilaires en Se en fonction des différents niveaux de complémentation en Se illustre la difficulté à établir un tel seuil (cf *Figure 11*).

Ainsi, comme pour le Zn, il n'y a aucune concordance entre l'information donnée par l'analyse pilaire et les complémentations alimentaires en Se réalisées sur les animaux.

B - Comparaison entre la concentration pilaire et la concentration sanguine en oligoélément

1 - Zinc

Les concentrations pilaires en zinc par rapport aux concentrations plasmatiques en zinc sont présentées dans les *Figure 12*, *Figure 13*, *Tableau 14* et *Tableau 15*.

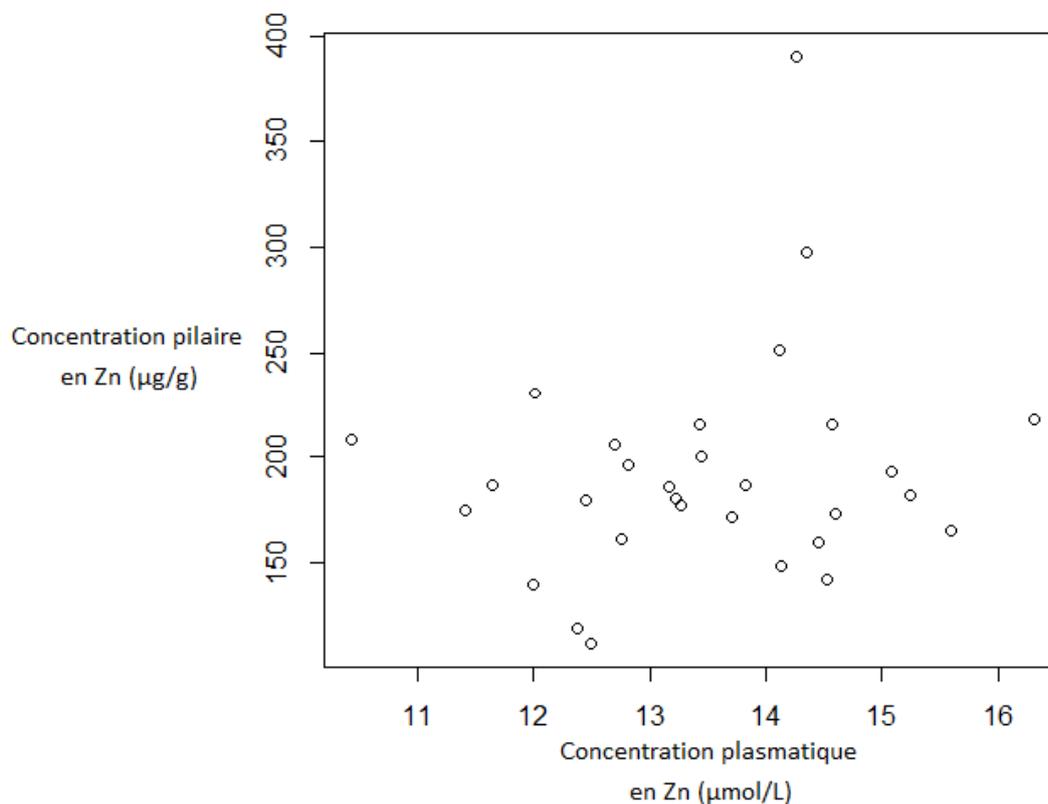


Figure 12 : Diagramme de dispersion représentant la concentration pilaire en Zn en fonction de la concentration plasmatique en Zn de l'élevage (moyenne des valeurs individuelles) observée sur 30 élevages

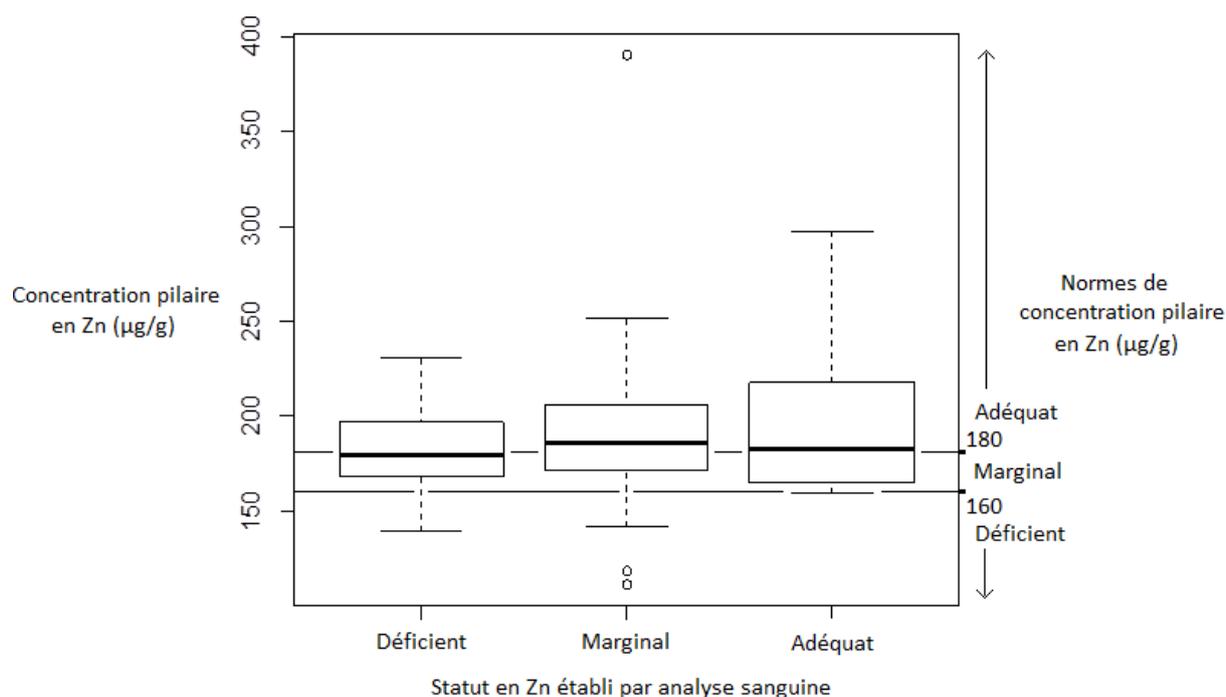


Figure 13 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pilaires en Zn des élevages en fonction de leur statut en Zn obtenu par analyse sanguine

Tableau 14 : Concentration pilaire en Zn des élevages en fonction du statut en Zn déterminé par analyse sanguine (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p > 0,05$))

Statut en Zn établi par analyse sanguine	Concentration pilaire en Zn ($\mu\text{g/g}$)					Nombre d'élevage
	Moyenne	Ecart type	25%	Médiane	75%	
Déficient	182,60 ^a	29,88	167,80	179,40	197,20	7
Marginal	192,70 ^a	61,93	171,10	186,00	205,40	17
Adéquat	200,80 ^a	51,97	166,80	182,90	211,60	6

La concentration pilaire en Zn n'augmente pas sensiblement avec la concentration plasmatique (*cf Figure 12*). Les distributions des concentrations pilaires en Zn de l'élevage en fonction de leur statut en Zn obtenu par analyse sanguine se recoupent très largement (*cf Figure 13*). En effet, les médianes et 1^{er} quartiles des concentrations pilaires pour chaque statut en Zn des élevages fourni par analyse sanguine sont quasiment égaux (*cf Tableau 14*). Aucune différence significative entre les concentrations pilaires en Zn pour les différents

statuts en Zn obtenus par analyse sanguine n'est observable ($p=0,92$) et la corrélation entre la concentration pilaire et plasmatique en Zn est nulle ($r=0,135$ et $p=0,48$).

Tableau 15 : Table de contingence décrivant la répartition des statuts en Zn obtenus par analyse pilaire ou par analyse sanguine observées sur 30 élevages

Statut en Zn obtenu par analyse sanguine	Statut en Zn obtenu par analyse pilaire			Total
	Déficient	Marginal	Adéquat	
Déficiente	1	3	3	7
Marginale	4	3	10	17
Adéquate	1	2	3	6
Total	6	8	16	30

Seuls 7 élevages présentent des statuts similaires en Zn que ce soit avec l'analyse pilaire ou sanguin (cf *Tableau 15*). La concordance statistique entre ces deux méthodes de détermination du statut de l'élevage en Zn est « très mauvaise » ($K= -0,05$).

Ainsi, les informations fournies par l'analyse pilaire sur le statut en Zn d'un troupeau ne concordent pas avec celles fournies par l'analyse sanguine.

2 - Cuivre

Les teneurs en cuivre des poils en fonction de la concentration plasmatique en cuivre sont présentées dans les *Figure 14, Figure 15, Tableau 16 et Tableau 17*.

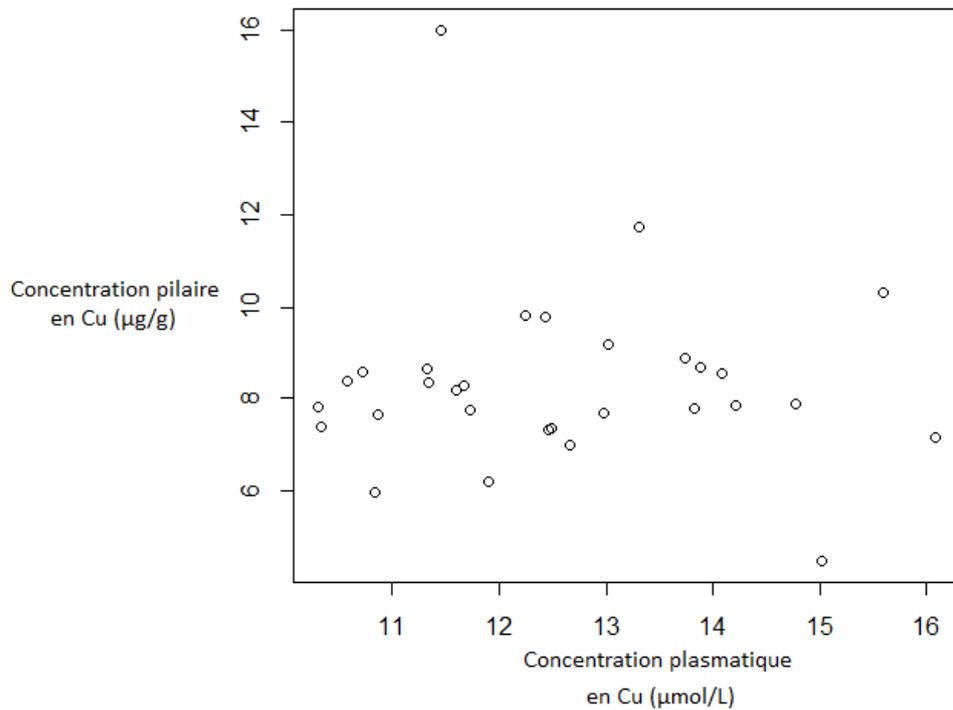


Figure 14 : Diagramme de dispersion représentant la concentration pilaire en Cu en fonction de la concentration plasmatique en Cu de l'élevage (moyenne des valeurs individuelles) observée sur 30 élevages

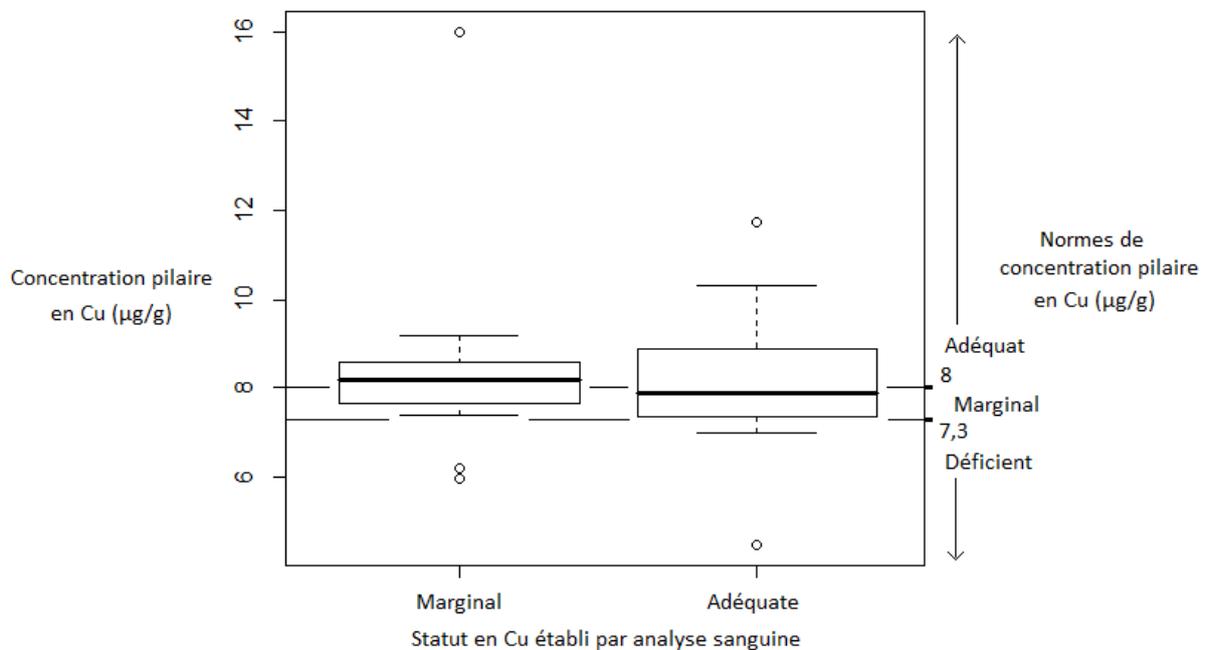


Figure 15 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pilaires en Cu de l'élevage en fonction de leur statut en Cu obtenu par analyse sanguine

Tableau 16 : Concentration pileire en Cu des élevages en fonction du statut en Cu déterminé par analyse sanguine (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))

Statut en Cu établi par analyse sanguine	Concentration pileire en Cu ($\mu\text{g/g}$)					Nombre d'élevage
	Moyenne	Ecart type	25%	Médiane	75%	
Déficient	-	-	-	-	-	0
Marginal	8,45 ^a	2,44	7,65	8,18	8,55	13
Adéquat	8,26 ^a	1,61	7,33	7,86	8,87	17

Comme pour le Zn, La concentration pileire en Cu n'augmente pas avec la concentration plasmatique en Cu (*cf Figure 14*). La médiane de la concentration pileire en Cu chez les élevages ayant un statut « adéquat » selon l'analyse sanguine est inférieure à celle observée dans les élevages ayant un statut « marginal » (*cf Figure 15 et Tableau 16*). La corrélation statistique entre la concentration pileire et la concentration plasmatique en Cu est nulle ($r=0,036$ et $p=0,85$), et il n'existe pas de différence significative ($p=0,87$) entre les concentrations pileires des élevages selon leur statut « adéquat » ou « marginal » en Cu établi par analyse sanguine.

Tableau 17 : Table de contingence décrivant la répartition des statuts en Cu obtenus par analyse pileire ou par analyse sanguine observée sur 30 élevages

Statut en Cu obtenu par analyse sanguine	Statut en Cu obtenu par analyse pileire			Total
	Déficient	Marginal	Adéquat	
Déficient	0	0	0	0
Marginal	2	5	6	13
Adéquat	4	5	8	17
Total	6	10	14	30

Seulement 13 élevages ont selon l'analyse pileire et sanguine le même statut en Cu (*cf Tableau 17*). La concordance statistique entre les deux méthodes est « mauvaise » ($K=0,01$).

De même que pour le Zn, les informations données par la concentration pilaire et la concentration plasmatique pour la détermination du statut en Cu des bovins ne concordent pas.

3 - Sélénium

La relation entre les teneurs pilaires en sélénium et les activités de la glutathion-peroxydase érythrocytaire est présentée dans les *Figure 16, Figure 17, Tableau 18* et *Tableau 19*.

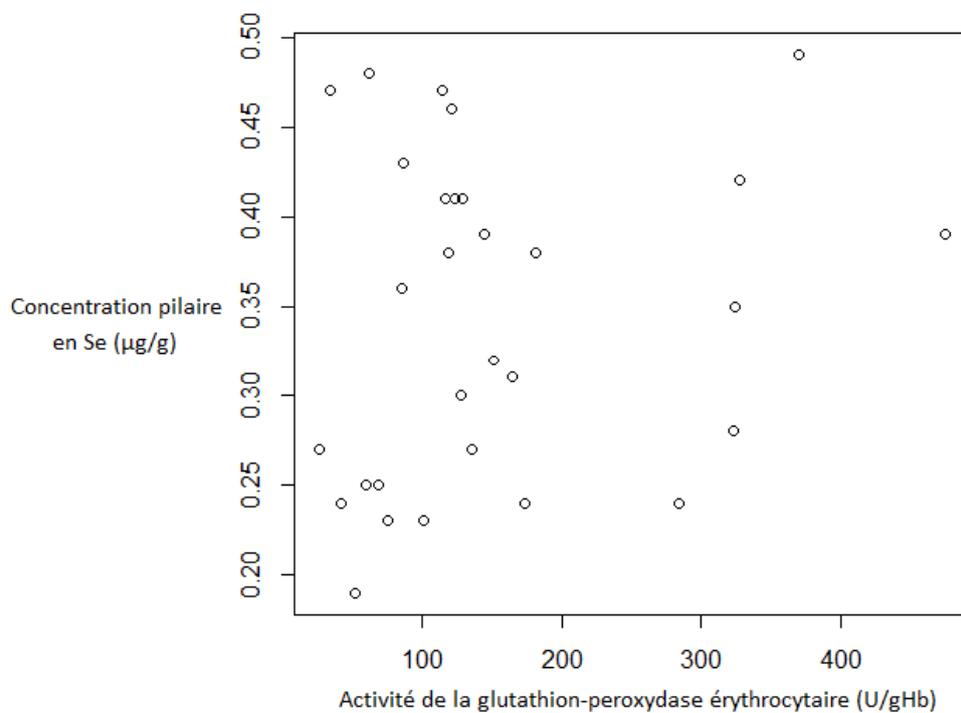


Figure 16 : Diagramme de dispersion représentant la concentration pilaire en Se en fonction de l'activité de la glutathion-peroxydase érythrocytaire de l'élevage (moyenne des valeurs individuelles) observée sur 30 élevages

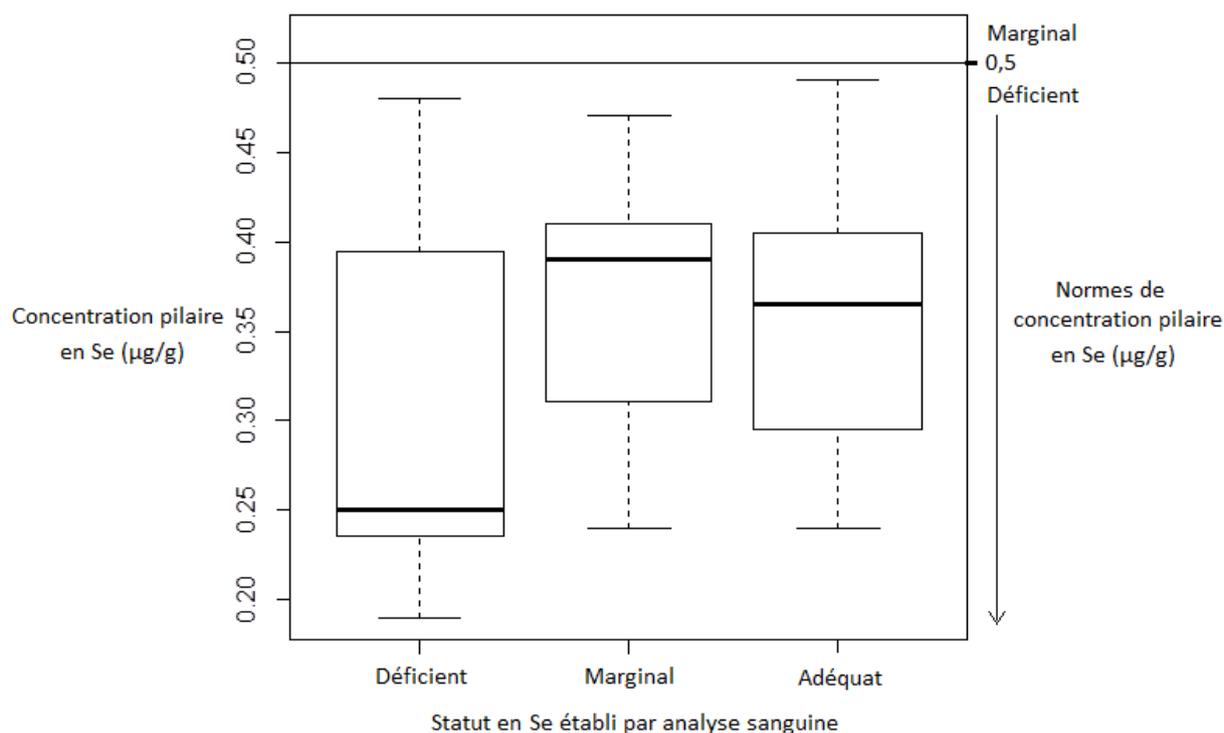


Figure 17 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pilaires en Se de l'élevage en fonction de leur statut en Se obtenu par analyse sanguine

Tableau 18 : Concentration pilaire en Se des élevages en fonction du statut en Se déterminé par analyse sanguine (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p > 0,05$))

Statut en Se établi par analyse sanguine	Concentration pilaire en Se ($\mu\text{g/g}$)					Nombre d'élevage
	Moyenne	Ecart type	25%	Médiane	75%	
Déficient	0,309 ^a	0,110	0,235	0,250	0,395	11
Marginal	0,370 ^a	0,076	0,310	0,390	0,410	11
Adéquat	0,360 ^a	0,080	0,300	0,365	0,400	8

L'observation de la dispersion de la concentration pilaire en Se en fonction de l'activité de la glutathion-peroxydase érythrocytaire ne présente aucune tendance (*cf Figure 16*). Il en est de même pour les distributions des concentrations pilaires en Se des élevages en fonction de leur statut en Se obtenu par analyse sanguine qui se recourent très largement (*cf Figure 17*). De plus, la médiane des concentrations pilaires des élevages « adéquat » est inférieure à celle obtenue pour les élevages « marginaux » (*cf Tableau 18*). Statistiquement, il n'existe aucune corrélation entre la concentration pilaire en Se et

l'activité de la glutathion-péroxydase érythrocytaire ($r=0,18$ et $p=0,33$), et les concentrations pilaires des élevages en fonction de leur statut en Se établi par analyse sanguine ne sont pas significativement différente ($p=0,26$).

Tableau 19 : Table de contingence décrivant la répartition des statuts en Se obtenus par analyse pilaire ou par analyse sanguine observée sur 30 élevages

Statut en Se obtenu par analyse sanguine	Statut en Se obtenu par analyse pilaire			Total
	Déficient	Marginal	Adéquat	
Déficiente	11	0	0	11
Marginale	11	0	0	11
Adéquate	8	0	0	8
Total	30	0	0	30

D'après l'analyse pilaire, tous les élevages prélevés ont un statut « déficient » en Se, ce qui n'est pas le cas pour l'analyse sanguine qui classe les 30 élevages prélevés parmi les trois statuts (*cf Tableau 19*). Ainsi, la concordance statistique entre les deux méthodes de détermination du statut en Se de l'élevage est « mauvaise » ($K=0$).

Comme pour le Zn et le Cu, les données sur le statut en Se des bovins obtenues par analyse pilaire ne concordent pas avec celles obtenues par analyse sanguine.

C - Comparaison entre la concentration sanguine et la complémentation alimentaire en oligoélément

1 - Zinc :

Les concentrations sanguines en zinc en fonction du niveau de complémentation en zinc sont présentées dans les *Figure 18*, *Tableau 20* et *Tableau 21*.

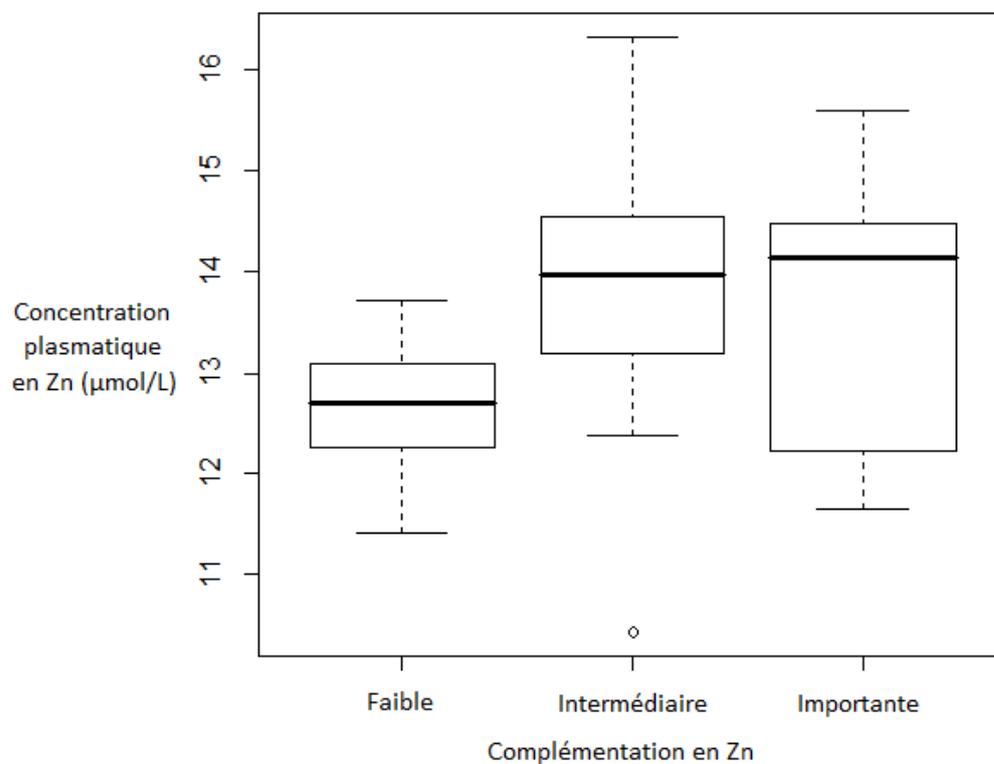


Figure 18 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations plasmatiques en Zn des élevages (moyennes des valeurs individuelles) en fonction de leur niveau de complémentation en Zn

Tableau 20 : Concentration plasmatique en Zn des élevages en fonction du niveau de complémentation en Zn (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p>0,05$))

Complémentation en Zn	Concentration plasmatique en Zn ($\mu\text{mol/l}$)					Nombre d'élevage
	Moyenne	Ecart type	25%	Médiane	75%	
Faible	12,65 ^a	0,79	12,25	12,69	13,10	7
Intermédiaire	13,82 ^a	1,35	13,21	13,98	14,54	16
Importante	13,54 ^a	1,50	12,22	14,14	14,48	7

Graphiquement, on peut visualiser des médianes de concentrations plasmatiques en Zn supérieures pour les élevages pratiquant une complémentation « intermédiaire » et « importante » par rapport à ceux pratiquant une complémentation « faible » (*cf Figure 18 et Tableau 20*). Les distributions des concentrations plasmatiques en Zn des élevages pour les différents niveaux de complémentation ne présentent cependant aucune différence significative ($p=0,11$). En effet, les différentes répartitions en fonction du niveau de complémentation se recoupent à plus de 50% (*cf Figure 18*).

Tableau 21 : Table de contingence décrivant la répartition des niveaux de complémentation et des statuts en Zn observée sur 30 élevages

Complémentation en Zn	Statut en Zn obtenu par analyse sanguine			Total
	Déficient	Marginal	Adéquat	
Faible	3	4	0	7
Intermédiaire	1	12	3	16
Importante	3	1	3	7
Total	7	17	6	30

Soixante pour cent des élevages prélevés présentent des résultats concordants avec les deux méthodes d'évaluation du statut en Zn (*Tableau 21*). La concordance statistique est « passable » ($K= 0,28$) entre les deux méthodes.

Ainsi, bien qu'une concordance existe entre les informations fournies par le niveau de complémentation en Zn des bovins et leur concentration sanguine, celle-ci est faible.

2 - Cuivre :

La relation entre les concentrations plasmatiques en cuivre et le niveau de complémentation en cuivre est présentée dans les *Figure 19*, *Tableau 22* et *Tableau 23*.

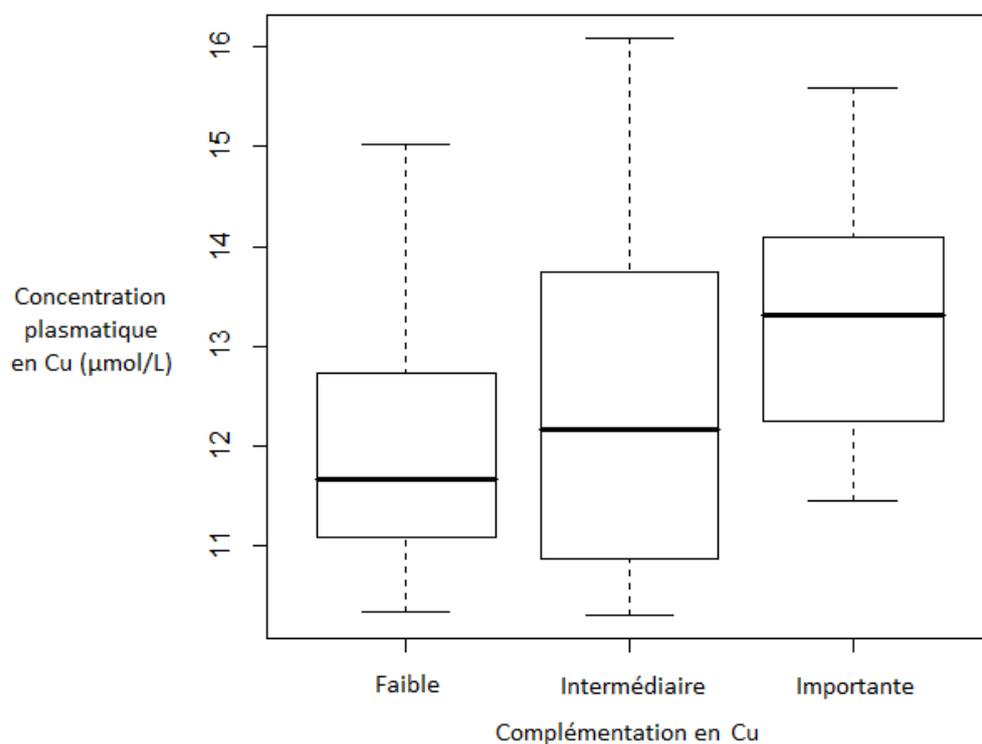


Figure 19 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations plasmatiques en Cu des élevages (moyennes des valeurs individuelles) en fonction de leur niveau de complémentation en Cu

Tableau 22 : Concentration plasmatique en Cu des élevages en fonction du niveau de complémentation en Cu (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p > 0,05$))

Complémentation en Cu	Concentration plasmatique en Cu ($\mu\text{mol/l}$)					Nombre d'élevage
	Moyenne	Ecart type	25%	Médiane	75%	
Faible	12,09 ^a	1,57	11,09	11,66	12,72	7
Intermédiaire	12,34 ^a	1,65	10,98	12,16	13,47	14
Importante	13,33 ^a	1,41	12,24	13,31	14,09	9

La totalité des concentrations plasmatiques en Cu obtenues dans les élevages à complémentation « importante » et « faible » sont comprises dans l'intervalle de répartition des concentrations sanguines obtenues pour les élevages à complémentation « intermédiaire » en Cu (*cf Figure 19 et Tableau 22*). Ainsi, malgré des moyennes de concentrations plasmatiques en Cu croissante en fonction des apports alimentaires en Cu, les répartitions des concentrations sanguines en Cu en fonction du niveau de complémentation en Cu se recoupent très largement, et ne présentent aucune différence significative entre elles ($p=0,51$).

Tableau 23 : Table de contingence décrivant la répartition des niveaux de complémentation et des statuts en Cu observée sur 30 élevages

Complémentation en Cu	Statut en Cu obtenu par analyse sanguine			Total
	Déficient	Marginal	Adéquat	
Faible	0	3	4	7
Intermédiaire	0	7	7	14
Importante	0	3	6	9
Total	0	13	17	30

Seulement 13 élevages parmi les élevages prélevés, soit moins de 50%, ont un statut en Cu concordant que ce soit par analyse du niveau de complémentation ou par analyse sanguine (*cf Tableau 23*). La concordance statistique est « mauvaise » ($K= 0,08$). On note aussi l'absence d'élevage ayant un statut « déficient » selon l'analyse sanguine, malgré la diversité des niveaux de complémentation en Cu (*cf Tableau 23*). On peut donc penser que le seuil de déficience de $8 \mu\text{mol/l}$ est trop bas, mais les distributions de concentration sanguine observées dans cette étude ne permettent pas de fixer un tel seuil (*cf Figure 19*).

Il n'existe donc pas de concordance entre les informations fournies par le niveau de complémentation en Cu des bovins et la concentration plasmatique en Cu.

3 - Sélénium :

Les activités de la glutathion-péroxydase érythrocytaire en fonction de la complémentation en sélénium des élevages sont présentées dans les *Figure 20*, *Tableau 24* et *Tableau 25*.

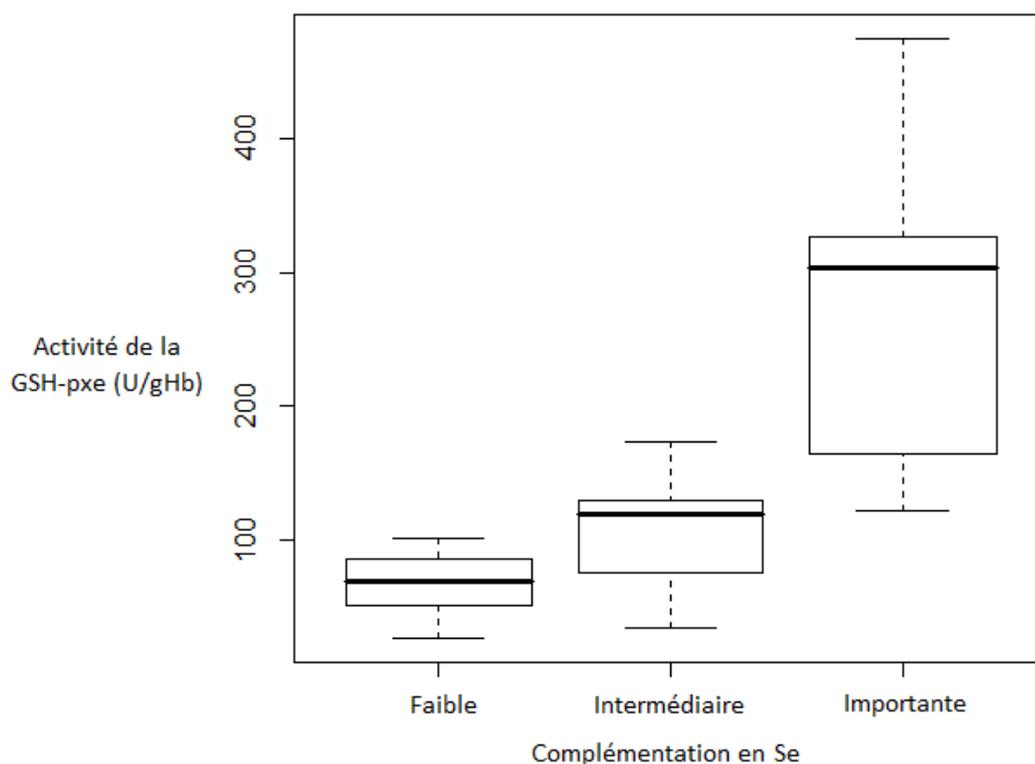


Figure 20 : Diagrammes en boîte des distributions des activités de la glutathion-péroxydase érythrocytaire des élevages (moyennes des valeurs individuelles) en fonction de leur niveau de complémentation en Se

Tableau 24 : Concentration sanguine en Se des élevages en fonction du niveau de complémentation en Se (a, b, c : les moyennes ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement ($p > 0,05$))

Complémentation en Se	Activité de la glutathion-péroxydase érythrocytaire (U/gHb)					Nombre d'élevage
	Moyenne	Ecart type	25%	Médiane	75%	
Faible	67,47 ^a	26,23	51,35	69,20	86,10	7
Intermédiaire	108,10 ^a	40,19	75,20	118,50	129,30	13
Importante	271,90 ^b	113,55	168,20	303,60	326,20	10

Les niveaux d'activité de la GSH-pxe sont croissants avec l'augmentation de la complémentation en Se. De plus, contrairement à ce qui est observé dans le cas du Zn et du Cu, les distributions pour chacun des 3 niveaux de complémentation en Se ne se recoupent que très peu (*cf Figure 20 et Tableau 24*). Il existe à la fois une différence significative ($p=7,54.10^{-5}$) entre les activités de la GSH-pxe selon leur niveau de complémentation en Se.

Tableau 25 : Table de contingence décrivant la répartition des niveaux de complémentation et des statuts en Se observés sur 30 élevages

Complémentation en Se	Statut en Se obtenu par analyse sanguine			Total
	Déficient	Marginal	Adéquat	
Faible	7	0	0	7
Intermédiaire	4	9	0	13
Importante	0	2	8	10
Total	11	11	8	30

Pour 24 élevages, soit 80% des élevages prélevés, les statuts en Se obtenus par analyse de la complémentation en Se et mesure de l'activité de la GSH-pxe sont concordants (*cf Tableau 25*). Ainsi, statistiquement, ces deux méthodes de détermination du statut en Se des bovins présentent une concordance « bonne » ($K= 0,77$).

Les informations fournies par la mesure de l'activité de la GSH-pxe sont donc concordantes avec le niveau de complémentation en sélénium des bovins.

D - Incidence de la présence de métaux galvanisés dans l'élevage sur la concentration pilaire en Zn

Actuellement, dans la plupart des stabulations, les moyens de séparation et de contention des bovins sont constitués de tubes métalliques galvanisés (*cf Photo 1*). Ceci est le cas de 26 élevages dans cette étude, contre seulement 4 élevages possédant des moyens de contention en bois.

Les résultats de la relation entre la concentration pilaire en zinc des bovins et la présence ou non de matériaux galvanisés dans l'environnement des bovins sont présentés dans la *Figure 21 et Tableau 26*.

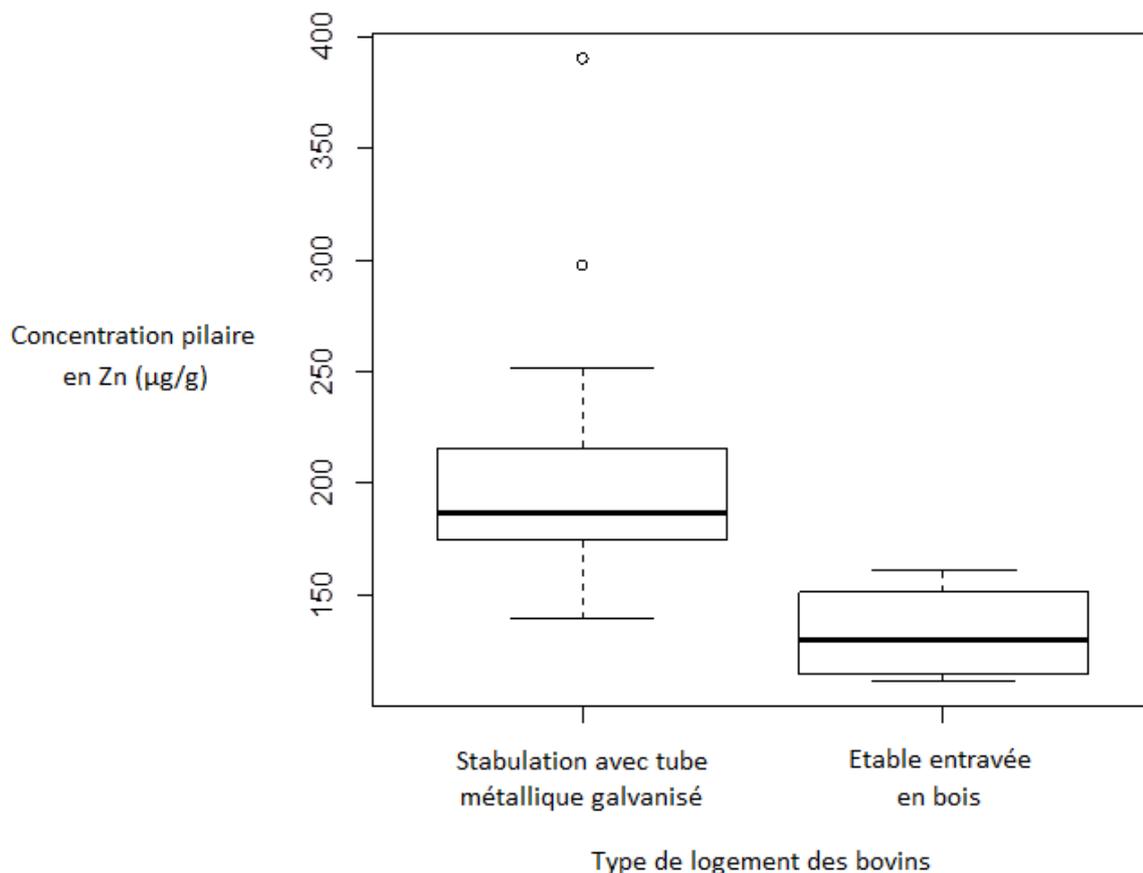


Figure 21 : Diagrammes en boîte des distributions des concentrations pilaires en Zn des élevages en fonction de la présence ou non de tubes métalliques galvanisés dans l'environnement des bovins

Tableau 26 : Concentration pilaire en Zn des élevages en fonction de la présence ou non de tubes métalliques galvanisés dans l'environnement des bovins

Type de logement des bovins	Concentration pilaire en Zn ($\mu\text{g/g}$)					Nombre d'élevage
	Moyenne	Ecart type	25%	Médiane	75%	
Etable entravée en bois	133,10	22,42	116,70	130,00	146,50	4
Stabulation avec tubes métalliques galvanisées	201,00	50,52	175,50	186,70	213,20	26

Les deux distributions de la concentration pilaire en Zn en fonction de la présence ou non de tubes métalliques galvanisés dans l'environnement des bovins ne se recoupent que très peu (*cf Figure 21*). De plus, les médianes de ces deux distributions semblent différentes (*cf Tableau 26*). Les effectifs très différents des deux types de logements (*cf Tableau 26*) et le faible nombre d'élevages sans structure galvanisée (4) ne permettent pas de réaliser une analyse statistique. Néanmoins il semble bien y avoir une tendance à des teneurs en Zn plus élevée dans les poils des élevages avec des structures en acier galvanisé.

III - Discussion

- **Relation entre le dosage des oligoéléments dans les poils et l'apport alimentaire réalisé sur les animaux :**

Les résultats observés dans cette étude concernant le Zn et le Se sont clairs, il n'existe pas de relation entre les complémentations de ces deux éléments et leur teneur pilaire.

Cependant, l'analyse des pratiques d'alimentation minérale effectuée dans cette étude tient compte uniquement des apports en oligo-élément réalisés en plus de ceux pouvant être apportés par les fourrages. Cependant, les 30 élevages prélevés étant situés dans un périmètre restreint (12km de diamètre), on peut raisonnablement penser que les

fourrages utilisés dans les élevages ne diffèrent pas significativement pour ce qui concerne leurs teneurs en oligoéléments. En effet, la teneur en oligoéléments dans les plantes est conditionnée entre autres par la nature des sols sur lesquels elles poussent (MESCHY, 2010; UNDERWOOD & SUTTLE, 1999). On peut ainsi penser qu'au vu du périmètre géographique restreint de cette étude, la diversité de nature des sols est limitée.

En utilisant des teneurs moyennes citées dans la bibliographie (foin : 30mg/kgMS en Zn, 5 en Cu et 0,02 en Se ; paille : 10mg/kgMS en Zn, 4 en Cu et 0,02 en Se ; ensilages de maïs : 17mg/kgMS en Zn, 4 en Cu et 0,02 en Se), une ration alimentaire de base n'apporte, en moyenne, pas plus de 50% des apports recommandés en Zn et Cu et 20% pour le Se (INRA, 2007; BEGUIN & DAGORNE, 2003; BEGUIN, et al., 2001; COÏC & COPPENET, 1989; PERIAUD, et al., 1972). Or, les apports des complémentations en oligoéléments des élevages de l'étude étant classés en « complémentation faible » en Zn, Cu et Se, sont en fait inférieurs à 50% des recommandations pour le Zn et Cu et inférieurs à 80% des recommandations pour le Se. Ainsi, même en prenant en compte une part de Zn, Cu et Se apportée par les fourrages, ces élevages n'apportent toujours pas suffisamment d'oligoéléments dans la ration pour être en accord avec les recommandations INRA. Le classement que l'on a établi en fonction de la complémentation minérale reste donc inchangé.

Les teneurs en Zn et Se dans les poils ne semblent pas refléter leurs niveaux respectifs d'apport alimentaire.

L'absence de relation entre l'apport alimentaire en Zn et sa concentration pilaire mis en évidence dans notre étude confirme les études précédemment menées sur des bovins, chèvres et chevaux (PAVLATA, et al., 2011; WELLS & RALSTON, 1990; BEESON, et al., 1977).

Pour ce qui est du Se, à l'inverse des résultats trouvés dans cette étude, des études précédemment menées semblaient établir un lien entre les apports alimentaires en Se et sa concentration pilaire chez les rats et les bovins (SALBE & LEVANDIER, 1990; PERRY, et al., 1976; HIDIROGLOU, et al., 1965). Cependant, d'après SALBE et LEVANDIER (1990) la teneur pilaire en Se est aussi dépendante des apports alimentaires en Méthionine (SALBE & LEVANDIER, 1990).

Pour le Cu, les dosages dans les poils de bovins permettent d'identifier les élevages pratiquant une complémentation importante par rapport aux autres pratiquant une

complémentation moindre. Ces résultats sont en accord avec les données bibliographiques (SUTTLE & McMURRAY, 1983; SUTTLE & ANGUS, 1976; O'MARY, et al., 1970), qui montrent une faible concordance entre la concentration du Cu dans les poils et l'apport alimentaire en Cu réalisé sur les animaux.

- **Relation entre les concentrations des oligoéléments dans les poils et dans le sang :**

Les coefficients de corrélation de rang de Spearman réalisés dans cette étude ne laissent aucun doute, les concentrations pilaires ne présentent aucune relation monotone avec les concentrations sanguines en Cu et Zn et avec l'activité de la GSH-pxe. De plus, les statuts nutritionnels établis par les deux méthodes sont différents à plus de 60%.

Ainsi, les teneurs en Zn, Cu et Se des poils de bovins ne nous informent pas sur leurs concentrations sanguines, et il ne fait aucun doute que ces deux méthodes de détermination du statut en oligoélément des bovins ne sont pas équivalentes tant les résultats obtenus par les deux méthodes sont discordants.

La composition minérale du poil est le reflet de plusieurs mois d'alimentation minérale (COMBS, et al., 1982; KELLAWAY, et al., 1978). Ceci pourrait être à l'origine des différences entre les résultats obtenus par analyse sanguine et par analyse pilaire.

Dans le cas du cuivre, il existe chez les bovins d'importantes réserves hépatiques en Cu. La concentration plasmatique en Cu est donc un indicateur d'une carence en Cu sur une longue période car elle ne diminue qu'à partir du moment où les réserves hépatiques sont épuisées, soit à partir de 2 à 3 mois (LAMAND, 1987; CLAYPOOL, et al., 1975). Le Cu plasmatique semble donc être comme le Cu pilaire le reflet de l'apport en Cu sur plusieurs mois.

Pour le sélénium, l'activité de la GSH-pxe est une mesure fonctionnelle du Se. L'activité mesurée dans le sang prend en compte la demi-vie des érythrocytes. Ce paramètre n'est affecté que lors d'une longue carence. En effet, la concentration de cette enzyme dans

les érythrocytes et donc son activité est dépendante des apports en Se au moment de l'érythropoïèse. Les érythrocytes ayant une longue durée de vie (150 jours chez le bovin), cette activité met longtemps à diminuer lors d'une carence en Se (LAMAND, 1987). Cette mesure, comme celle de l'analyse pilaire est donc le reflet des apports en Se réalisés sur plusieurs mois précédant le prélèvement.

Enfin, contrairement au Cu, les stocks de Zn de l'organisme sont faibles, le Zn plasmatique diminue donc rapidement, en 10 à 15 jours, lors d'une carence alimentaire en Zn (LAMAND, 1987). Le Zn plasmatique n'est donc pas un marqueur des apports en Zn réalisés sur plusieurs mois comme le serait le Zn pilaire. Cependant, les prélèvements de cette étude sont réalisés après plusieurs mois d'apport constant en oligoéléments (2 à 3 mois après la mise en place de la ration hivernale).

Le caractère « marqueur à long terme » de l'analyse pilaire ne semble donc pas être la raison de la discordance entre cette méthode et les méthodes d'analyse sanguine testées lors de cette étude.

- **Relation entre le dosage des oligoéléments dans le sang et l'apport alimentaire réalisé sur les bovins :**

Dans notre étude, il existe une relation entre les concentrations sanguines en Zn et Se et leur apport alimentaire respectif. Cette relation est faible mais présente dans le cas du Zn. La concentration plasmatique en Zn permet plus particulièrement d'identifier les élevages ayant une complémentation faible en Zn par rapport aux autres ayant une complémentation supérieure. Pour le Se, la relation existant entre l'activité de la GSH-pxe et l'apport alimentaire en Se est forte, avec 80% de résultats identiques pour les deux méthodes de détermination du statut nutritionnel en oligoélément.

Cependant, aucune concordance entre la concentration sanguine en Cu et l'apport alimentaire en Cu réalisé sur les bovins n'est observée dans cette étude.

Les concentrations plasmatiques en Cu ne classent aucun élevage dans un statut nutritionnel en Cu « déficient », c'est-à-dire qu'aucun élevage n'a une concentration plasmatique

inférieure à 8 $\mu\text{mol/l}$. Or l'analyse des complémentations alimentaires en Cu distribuées sur les bovins montre que 7 élevages ont des complémentations nettement insuffisantes (voire nulles) par rapport aux recommandations alimentaires habituelles.

Le Cu plasmatique ne diminue que lorsque les réserves hépatiques sont épuisées (LAMAND, 1987; CLAYPOOL, et al., 1975) On peut ainsi penser que la sévérité des carences au sein des élevages prélevés n'était pas assez importante pour épuiser les réserves hépatiques, et que ces réserves ont suffi à maintenir le pool plasmatique de Cu. Ceci laisserait à penser que les apports alimentaires en Cu de la ration de base sont malgré tout suffisants pour établir des réserves hépatiques et maintenir la cuprémie, ce qui peut être dû au fait que les teneurs en cuivre dans les fourrages peuvent présenter d'assez larges variations.

On peut aussi émettre l'hypothèse que la norme de déficience de 8 $\mu\text{mol/l}$ (pour le tercile) est trop basse. En effet, Il existe d'autres valeurs limites de carence qui sont supérieures à cette dernière. En effet, LAMAND (1987) et WOLTER (1992) fixent une limite de déficience à 11 $\mu\text{mol/l}$, et DORE *et al.* (2007) fixent eux une limite encore plus élevée à 13 $\mu\text{mol/l}$ (DORE, et al., 2007; WOLTER, 1992; LAMAND, 1987).

Ainsi, la faible concordance observée est peut-être due aux normes basses utilisées (ENJALBERT, et al., 2006). En effet, si on utilise des normes plus élevées (LAMAND, 1987), la concordance est meilleure ($K=0,22$ c'est à dire concordance « passable » comme pour le Zn)(cf *Tableau 27*). Cela confirme qu'il y a une relation, certes assez faible, entre les teneurs sanguines en cuivre et les apports alimentaires en cuivre.

Tableau 27 : Table de contingence décrivant la répartition des niveaux de complémentation et des statuts en Cu obtenus par analyse sanguine (normes de LAMAND (1987)) observée sur 30 élevages

Complémentation en Cu	Statut en Cu obtenu par analyse sanguine (avec les normes de LAMAND, M. (1987))			Total
	Déficient (<11 $\mu\text{mol/l}$)	Marginal (entre 11 et 12,6 $\mu\text{mol/l}$)	Adéquat (> 12,6 $\mu\text{mol/l}$)	
Faible	2	3	2	7
Intermédiaire	4	5	5	14
Importante	0	3	6	9
Total	6	11	13	30

Comme on vient de le voir, les concentrations sanguines en oligoéléments ne sont pas toujours reliées à leur apport alimentaire. Ceci peut néanmoins être révélateur d'avantages appartenant à cette méthode de mesure. En effet, le dosage sanguin permet, contrairement à l'analyse des pratiques d'alimentation minérale, de tenir compte de l'absorption intestinale, ce qui permet de prendre en compte le fait que tous les bovins n'absorbent pas les minéraux dans les mêmes proportions en fonction des différentes rations (interaction entre les différents minéraux notamment), des individus, des éventuelles pathologies... Les analyses sanguines, quel que soit le paramètre mesuré (Zn plasmatique, Cu plasmatique, activité de la GSH-pxe), est donc une estimation du Zn, Cu et Se absorbés. Ainsi, de telles analyses permettent de détecter non seulement une insuffisance d'apport, mais aussi d'autres paramètres pouvant provoquer des carences secondaires en oligoéléments.

Une étude rétrospective, réalisée sur 2080 élevages bovins, établit des facteurs de risques pour différents troubles au sein des élevages en fonction de leurs statuts nutritionnels en Zn, Cu et Se déterminé par analyse sanguine. Cette étude révèle des facteurs de risques de performances zootechniques diminuées et d'apparition de pathologie néonatale sur les veaux plus importants pour les élevages ayant un statut en Cu, Zn ou Se moindre (ENJALBERT, et al., 2006).

Ainsi, lors de notre étude, les analyses sanguines ne sont le fidèle reflet des apports alimentaires pour ce qui est du Cu et du Zn plasmatique. Cependant on peut relier l'analyse sanguine à une probabilité d'apparition dans un élevage de troubles liés à une éventuelle carence en oligoélément, ceci en fait une méthode très intéressante pour la détermination du statut nutritionnel en oligoélément. Selon LAMAND (1987), le dosage du Zn plasmatique est un indicateur « extrêmement précieux » des apports en Zn. Il en est de même pour la mesure de la glutathion peroxydase érythrocytaire qui est un « excellent reflet » de la nutrition en Se (LAMAND, 1987). Le Cu plasmatique est quant à lui un paramètre « fiable » pour peu que l'on garde à l'esprit que cette concentration ne diminue qu'une fois les réserves hépatiques épuisées, ce qui en fait un indicateur tardif (MESCHY, 2010; LAMAND, 1987; CLAYPOOL, et al., 1975).

Les mesures de l'activité de la GSH-pxe et du Zn plasmatique donnent donc des informations précieuses sur le statut en oligoéléments des bovins. Cependant, il convient d'interpréter avec précaution la mesure du Cu plasmatique.

- **Influence de l'environnement sur la composition minérale du poil :**

En accord avec les données bibliographiques, nous retrouvons dans cette étude une influence certaine des oligoéléments contenus dans l'environnement sur la concentration pilaire de ceux-ci. En effet, malgré le faible nombre d'élevages témoins (4 sur 30), la présence de tubes métalliques galvanisés dans l'environnement des bovins a pour effet d'augmenter leur concentration pilaire en Zn.

Ainsi, le poil peut être « contaminé » par les oligoéléments d'origine exogène, comme c'est le cas avec le Zn contenu dans le revêtement des tubes métalliques galvanisés, ce qui pose problème dans les élevages bovins actuels où ces tubes métalliques galvanisés sont omniprésents. De plus, la principale voie d'élimination du Zn et du Cu est la voie fécale, ainsi, on peut penser que de la même manière les poils peuvent être contaminés par le Zn et le Cu contenus dans les matières fécales (MESCHY, 2010; MILLER, 1970).

Ces contaminations peuvent donc biaiser l'interprétation que l'on pourrait faire de la concentration pilaire en oligoélément.

- **Conclusion :**

Les concentrations pilaires en Zn, Cu et Se ne permettent pas d'obtenir les informations données par les dosages du Zn et Cu plasmatiques et par la mesure de l'activité de la glutathion peroxydase érythrocytaire. Les teneurs pilaires en Zn et Se ne reflètent pas non plus leurs apports alimentaires. Pour le Cu, bien qu'il existe une relation entre la teneur pilaire en Cu et les apports alimentaires en Cu, celle-ci est faible, et donc peu fiable.

De plus, il apparait au moins avec le Zn que les poils sont possiblement contaminés par des oligoéléments d'origine exogène.

Ainsi, l'analyse pilaire n'est pas un indicateur fiable. Nous ne recommandons pas l'utilisation des analyses pilaires dans le but d'estimer le statut nutritionnel en Zn, Cu et Se d'un troupeau de bovin.

Par contre l'analyse pilaire garde tout son intérêt pour détecter la présence d'une substance ingérée afin d'objectiver une intoxication, dans le cas des métaux lourds par exemple.

CONCLUSION

Les carences en oligo-éléments chez les bovins peuvent être responsables d'une baisse des performances zootechniques et de troubles de santé majeurs. Ceci revêt une importance économique non négligeable, en particulier en élevage allaitant où la bonne santé et la bonne croissance du veau conditionnent directement les revenus de l'élevage. Il est donc très intéressant de connaître le statut nutritionnel des vaches afin d'ajuster leur complémentation en oligo-éléments le cas échéant. Il existe plusieurs méthodes afin d'estimer le statut nutritionnel pour un oligoélément chez les bovins, comme notamment les dosages sanguins ou bien l'analyse des pratiques d'alimentation minérale de l'élevage. Il est aussi réalisé sur le terrain des dosages d'oligoéléments dans les poils des bovins dans le but d'estimer le statut nutritionnel. Cependant, les données bibliographiques concernant la validation de cette méthode sont très contradictoires.

Nous avons réalisé une étude afin d'évaluer la méthode de détermination du statut nutritionnel en oligo-éléments d'un troupeau par le dosage du Zinc, du Cuivre et du Sélénium dans les poils. Des dosages pilaires ont été réalisés sur 30 élevages bovins allaitants de race charolaise. En parallèle, des dosages sanguins et l'analyse des pratiques d'alimentation minérale ont été conduits.

La comparaison de ces trois méthodes montre que:

- 1) Les teneurs en Zinc et en Sélénium des poils ne reflètent pas la quantité de complémentation respectivement en Zinc et Sélénium distribués aux bovins. La concentration pilaire en Cuivre présente une relation positive, bien que faible, avec la quantité de complémentation en Cu réalisée sur les bovins.
- 2) Les concentrations pilaires en Zinc, Cuivre et Sélénium ne présentent aucune relation avec les dosages sanguins respectifs.
- 3) La concentration pilaire en Zinc semble être significativement modifiée par le zinc contenu dans l'environnement.

Ainsi, au vue des données bibliographiques et des résultats de notre étude, le dosage des oligo-éléments dans les poils ne fournit pas des résultats permettant d'objectiver le statut nutritionnel des bovins.

Thèse de M. TETU Camille

Le Professeur responsable
VetAgro Sup campus vétérinaire



Laurent ALVES de OLIVEIRA
Maître de Conférences

Le Président de la thèse



Vu et permis d'imprimer

Le Directeur général
VetAgro Sup



Par délégation
Pr F. Grain - DEVE
VetAgro Sup
Campus Vétérinaire

Lyon, le

12 SEP. 2013

Pour le Président de l'Université,
Le Président du Comité de Coordination des Etudes Médicales,
Professeur F.N GILLY



Bibliographie

BEESON, W., PERRY, T. & ZURCHER, T., 1977. Effect of supplemental zinc on growth and on hair and blood serum levels of beef cattle. *J. Anim. Sci.*, 45, pp. 160-165.

BEGUIN, J. & DAGORNE, R., 2003. Evolution et variations de la teneur en minéraux du maïs ensilage et conséquences sur la complémentation minérale des vaches laitières. Dans: *Proceedings 10ème Congrès Rencontres Recherches Ruminants*. Paris, 3 - 4 Décembre 2003: 3R, Paris, p. 390.

BEGUIN, J., DAGORNE, R. & GIRONA, A., 2001. Teneur en éléments minéraux de l'herbe pâturée par les vaches laitières. Dans: *Proceedings 8ème congrès Rencontres Recherches Ruminants*. Paris, 5-6 décembre 2001: 3R, Paris.

CHRISTODOULOPOULOS, G., ROUBIES, N., KARATZIAS, H. & PAPASTERIADIS, A., 2003. Selenium concentration in blood and hair of Holstein dairy cows. *Bio. Trace Element Res.*, 91, pp. 145 - 150.

CLAYPOOL, D.W., ADAMS, F.W., PENDELL, H.W., HARTMANN, Jr.N.A., BONE, J.F., 1975. Relationship between the level of copper in the blood plasma and liver of cattle. *J. Anim. Sci.*, 41, pp. 911 - 914.

COHEN, R., 1973. Relation of pasture phosphorus content of blood, hair and bone of grazing steers.. *Australian J. Exp. Agr. Anim. Hus.*, 13(60), pp. 5 - 8.

COÏC, Y. & COPPENET, M., 1989. Les teneurs des plantes fouragères en oligoéléments. Dans: Y. COÏC & M. COPPENET, éd. *Les oligoéléments en agriculture et élevage*. Paris: INRA, pp. 84 - 93.

COMBS, D., 1987. Hair Analysis as an indicator of mineral Status of Livestock. Volume 65, pp. 1753-1758.

COMBS, D., GOODRICH, R. & MEISKE, J., 1982. Mineral concentrations in hair as indicators of mineral status : a review. *J. Anim. Sci.*, 54, pp. 391 - 398.

COMBS, D., GOODRICH, R. & MEISKE, J., 1983. Influence of dietary zinc or cadmium on hair and tissue mineral concentrations in rats and goats. *J. Anim. Sci.*, 56, pp. 184 - 193.

DeANTONIO, S., KATZ, S., SCHEINER, D. & WOOD, J., 1982. Anatomically-related variations in trace-metal concentrations in hair. *Clin. Chem.*, 28(12), pp. 2411 - 2413.

DEEMING, S. & WEBER, C., 1977. Evaluation of hair analysis for determination of zinc status using rats. *Am. J. Clin. Nutr.*, Volume 30, pp. 2047 - 2052.

DORE, C., LACOURT, A., PRODHOMME, C. & CORNILLEAU, E., 2007. Cartographie des dosages plasmatiques d'oligo-éléments chez les bovins. Contribution d'un laboratoire de routine : le LDA 35. *Bull. des GTV*, 38, pp. 37 - 43.

DUNNETT, M., 2002. *The diagnostic potential of equine hair : a comparative review of hair analysis for assessing nutritional status, environmental poisoning, and drug use and abuse*, Thesis. Royal Veterinary College, University of London, UK : s.n.

ENJALBERT, F., LEBRETON, P. & SALAT, O., 2006. Effects of copper, zinc and selenium status on performance and health in commercial dairy and beef herds : retrospective study. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, 90, pp. 459 - 466.

FISHER, D., WILSON, L., LEACH, R. & SCHOLZ, R., 1985. Switch hair as an indicator of magnesium and copper status of beef cows. *Am. J. Vet. Res.*, 46(11) : 2235 - 2240.

FISHER, D., WILSON, L., LEACH, R. & SCHOLZ, R., 1985. Switch hair as an indicator of magnesium and copper status of beef cows. 46, p. 2235.

GALEZ, P., 2011. *Absorption atomique et émission de flamme*, Mesures Physiques Annecy: trouvable sur le site web : <http://www.iut-acy.univ-savoie.fr/> [En ligne] [Accès le 15 Janvier 2013].

GOULLE, J.P. MAHIEU, L., BONNEAU, L., LAINE, G., BOUIGE, D., LACROIX, C., 2005. Validation d'une technique de dosage multiélémentaire des métaux et métalloïdes dans les cheveux par ICP-MS. Valeurs de référence chez 45 témoins. 17(2), pp. 97-103.

HALL, R., SANDERS, W., BELL, M. & REYNOLDS, R., 1971. Effects of season and grass tetany on mineral composition of hereford cattle hair. *Am. J. Vet. Res.*, 32(10), pp. 1613 - 1619.

HEDGES, J. & KORNEGAY, E., 1973. Interrelationship of dietary copper and iron as measured by blood parameters, tissue stores and feedlot performance of swine. *J. Anim. Sci.*, 37, pp. 1147 - 1154.

HIDIROGLOU, M., CARSON, R. & BROSSARD, G., 1965. Influence of sélénium on the sélénium contents of hair and on the incidence of nutritional muscular disease in beef cattle. *Can. Animal Sci.*, 45, pp. 197 - 202.

HILDERBRAND, D. & WHITE, D., 1974. Trace-element analysis in hair : an evaluation. 20(2), pp. 148-151.

INRA, 2007. *Tables INRA 2007 CD-rom*, Paris: Quae.

IYENGAR, V., KUMPULAINEN, J., OKAMOTO, K., MORITA, M., HIRAI, S., NOMOTO, S., 1993. Recent trend in analytical approaches for trace element determinations in biomedical investigation. Dans: A. PRASAD, éd. *Essential and toxic trace elements in human health and disease : An update*. New York: Wiley-Liss, pp. 329-354.

Jourdain, s. w., s.d. <http://www.jourdain.fr/accueil/>. [En ligne] [Accès le 03 Septembre 2013].

KELLAWAY, R., SITORUS, P. & LEIBHOLZ, J., 1978. The use of copper levels in hair to diagnose hypocuprosis. *Res. Vet. Sci.*, 24, pp. 352 - 357.

KORNEGAY, E., THOMAS, H. & BARTLETT, H., 1981. Phosphorus in swine. III. Influence of dietary calcium and phosphorus levels and growth rate on rate on mineral content of hair from gilts and barrows or boars. *J. Anim. Sci.*, 52, pp. 1060 - 1069.

LABAT, L., 2010. La préparation des matrices biologiques pour l'analyse des métaux. *Ann. Tox. Anal.*, 22(2), pp. 81-88.

LAMAND, M., 1987. Place du laboratoire dans le diagnostic des carences en oligoéléments chez les ruminants. *Rec. Méd. Vét.*, 163(11), pp. 1071 - 1082.

LAMAND, M., FAVIER, A. & PINEAU, A., 1990. La détermination des oligoéléments dans les poils et dans les cheveux : intérêt et limites. *Ann. Biol. clin.*, 48, pp. 433-442.

LOWE, J., WISEMAN, J. & COLE, D., 1994. Zinc source influences zinc retention in hair and hair growth in the dog. *J. Nutr.*, 124, pp. 2575S - 2576S.

MANSON, P. & ZLOTKIN, S., 1985. Hair analysis - a critical review. *Can. Med. Assoc. J.*, 133(1), pp. 186-188.

- MARRIOTT, B.M., SMITH, J.C.Jr., JACOBS, R.M., LEE JONES, O., ALTMAN, J.D., 1996. Copper, iron, manganèse, and zinc content of hair from two populations of Rhesus Monkeys. *Bio. Trace Element Res.*, 53, pp. 167 - 183.
- MESCHY, F., 2007. Alimentation minérale et vitaminique des ruminants : actualisation des connaissances. *INRA Prod. Anim.*, 20(2), pp. 119 - 128.
- MESCHY, F., 2010. *Nutrition minérale des ruminants*. Versailles: Editions Quae.
- MILLER, W., 1970. Zinc nutrition of cattle: a review. *J. Dairy Sci.*, 53(8), pp. 1123 - 1135.
- MILLER, W. et al., 1966. Influence of zinc deficiency on zinc and dry matter content of ruminant tissues and on excretion of zinc. *J. Dairy Sci.*, 49(11), pp. 1446 - 1453.
- MILLER, W., POWELL, G., PITTS, W. & PERKINS, H., 1965. Factor affecting zinc content of bovine hair. *J. Dairy Sci.*, 48(8), pp. 1091-1095.
- MOESCH, C., 2007. Utilisation de l'ICP-MS en biologie clinique. *Ann. Toxicol. Anal.*, 19(1), pp. 11-21.
- MONTEINEIRO-RIVIERE, N., 2006. Integument. Dans: J. EURELL & B. FRAPPIER, édés. *Dellman's Textbook of Veterinary Histology 6th edition*. Oxford: Blackwell Publishing, pp. 320 - 349.
- NOLI, C., 1999. *Focus on skin and coat. Special Edition*. s.l.:Waltham Focus.
- NOUGUES, C. & LAMAND, M., 1972. Possibilités et limites de l'utilisation du poil dans le diagnostic de la carence en zinc chez le bovin. *Ann. Rech. Vét.*, 3(3), pp. 505 - 509.
- O'MARY, C., BELL, M., SNEED, N. & BUTTS, W., 1970. Influence of ration copper minerals in hair of Hereford and Holstein calves. *J. Anim. Sci.*, 31, pp. 626 - 630.
- O'MARY, C., BUTTS, W., REYNOLDS, R. & BELL, M., 1969. Effects of irradiation, age, season and color on mineral composition of hereford cattle hair. *J. Anim. Sci.*, 28, pp. 268 - 271.
- PAGLIA, D. & VALENTINE, N., 1967. Studies on the quantitative and qualitative characterization of erythrocyte glutathione peroxidase. *J. Lab. Clin. Med.*, 70, pp. 158 - 169.
- PATRA, R., SWARUP, D., SHARMA, M. & NARESH, R., 2006. Trace mineral profile in blood and hair from cattle environmentally exposed to lead and cadmium around different industrial units. *J. Vet. Med. A*, 53, pp. 511 - 517.

- PAVLATA, L., CHOMAT, M., PECHOVA, A., MISUROKA, L., DVORAK, R., 2011. Impact of long-term supplementation of zinc and selenium on their content in blood and hair in goats. *Veterinari Medicina*, 56(2), pp. 63 - 74.
- PERIAUD, S., BELLANGER, J. & LAMAND, M., 1972. Les oligo-éléments dans les foins en France. *Fourrages*, 52, pp. 11 - 37.
- PERRONE, L., MORO, R., CAROLI, M., DI TORO, R., GIALANELLA, G., 1996. Trace element in hair of healthy children sampled by age and sex. *Bio. Trace Element Res.*, 52, pp. 71 - 76.
- PERRY, T., BEESON, W., SMITH, W. & MOHLER, M., 1976. Effect of supplemental selenium on performance and deposit of selenium in blood and hair of finishing beef cattle. *J. Anim. Sci.*, 42, pp. 192 - 195.
- PETERING, H., YEAGER, D. & WITHERUP, S., 1971. Trace metal content of hair. I Zinc and Copper content of human hair in relation to age and sex. *Arch Environ Health*, 23(3), pp. 202-207.
- PINTA, M., 1971. Méthodes physiques d'analyse et de contrôle des oligo-éléments. *Ann. Nutr. Alim.*, 25, pp. 21-57.
- REINHOLD, J., KFOURY, G. & ARSLANIAN, M., 1968. Relation of zinc and calcium concentrations in hair to zinc in rats. *J. Nutr.*, 96, pp. 519 - 524.
- RYABUKHIN, Y., 1980. Nuclear-based methods for the analysis for trace element pollutants in human hair. *J. Radioanal. Chem.*, 60, pp. 7-30.
- SALBE, A. & LEVANDIER, O., 1990. Effect of various dietary factors on deposition of selenium in hair and nails of rats. *J. Nutr.*, 120, pp. 200 - 206.
- SCHAPCOTT, D., 1978. More on use of hair in trace-metal analysis. *Clin. Chem*, 24(2), pp. 391-392.
- SCHROEDER, H. & NASON, A., 1971. Trace-element analysis in clinical chemistry. *Clin. Chem.*, 17(6), pp. 461-474.
- SCOTT, D., 1988. Structure and function of the skin. Dans: D. SCOTT, éd. *Large animal dermatology*. Philadelphia: W.B. Saunders Compagny, pp. 1 - 28.

- SCOTT, D., 1990. The biology of hair growth and its disturbances. Dans: C. VON TSCHARNER & R. HALLIWELL, éd. *Advances in Veterinary Dermatology*. London: Baillière Tindall, pp. 1 - 33.
- SIM, J. & WRIGHT, C., 2005. The kappa statistic in reliability studies : use, interpretation, and sample size requirement. *Phys. Ther.*, 85, pp. 257 - 268.
- SUTTLE, N. & ANGUS, K., 1976. Experimental copper deficiency in the calf. *J. Comp. Path.*, 86, pp. 595 - 608.
- SUTTLE, N. & McMURRAY, C., 1983. Use of erythrocyte copper : zinc superoxide dismutase activity and hair or fleece copper concentrations in the diagnosis of hypocuprosis in ruminants. *Res. Vet. Sci.*, 35, pp. 47 - 52.
- UNDERWOOD, E. & SUTTLE, N., 1999. *The mineral nutrition of livestock 3rd edition*. Wallingford: CABI Publishing.
- WELLS, L. & RALSTON, S., 1990. Mineral intake and hair analysis of horses in Arizona. *J. Eq. Vet. Sci.*, 10, pp. 412 - 416.
- WOLTER, R., 1992. *Alimentation de la vache laitière*. Paris: Edition France agricole.
- WYSOCKI, A. & KLETT, R., 1971. Hair as an indicator of the calcium and phosphorus status of ponies. *J. Anim. Sci.*, 32(1), pp. 74 - 78.
- ZLOTKIN, S., 1985. Hair analysis : A useful tool or a waste of money?. *Int. J. Dermatol.*, 24(3), pp. 161-164.

Annexe 1 : Concentrations pilaires en zinc, cuivre et sélénium des 30 élevages prélevés

Elevage	Concentration pilaire (en µg/g)		
	en Zinc	en Cuivre	en Sélénium
1	186,82	8,87	0,47
2	390,03	9,83	0,38
3	214,91	7,76	0,41
4	199,97	8,34	0,48
5	297,40	8,18	0,39
6	174,91	7,66	0,24
7	196,46	6,98	0,39
8	160,65	7,30	0,25
9	186,02	7,85	0,24
10	251,39	7,86	0,42
11	207,89	7,33	0,38
12	186,51	8,66	0,31
13	217,88	7,14	0,41
14	215,37	9,77	0,41
15	159,10	8,63	0,32
16	182,06	7,65	0,30
17	179,83	7,74	0,23
18	141,73	8,55	0,36
19	179,35	15,99	0,46
20	118,33	7,79	0,27
21	111,74	7,39	0,27
22	177,27	8,35	0,19
23	171,08	8,25	0,25
24	205,36	5,96	0,43
25	192,71	6,17	0,47
26	230,11	4,48	0,23
27	172,99	10,33	0,28
28	139,08	9,16	0,35
29	148,07	8,53	0,24
30	164,68	11,75	0,49

Annexe 2 : Concentrations plasmatiques en zinc individuelles des 300 vaches prélevées (*inf.* : Infection ou inflammation)

Elevage	Valeur individuelle du zinc plasmatique (µmol/l)										Moyenne	1 ^{er} Tercile
1	13,06	14,00	13,38	culot	14,68	13,32	14,59	13,05	culot	14,57	13,83	13,32
2	13,20	11,24	15,52	12,63	15,51	16,62	12,04	15,55	13,24	17,10	14,27	13,20
3	14,40	12,93	culot	15,30	14,74	13,90	15,90	18,08	12,53	13,33	14,57	13,33
4	13,00	13,52	14,62	14,30	14,76	9,41	13,24	12,30	15,51	13,82	13,45	13,24
5	14,57	13,79	14,41	15,59	13,52	14,23	hémolyse	culot	14,39	15,81	14,36	14,23
6	11,47	12,03	9,26	8,54	11,15	13,90	13,63	13,89	11,93	8,25	11,41	11,15
7	13,17	9,06	7,72	14,44	13,25	13,77	11,98	15,80	12,79	16,16	12,81	12,79
8	15,98	15,16	11,97	culot	14,50	13,26	9,21	11,81	10,64	12,24	12,75	11,81
9	13,04	12,81	14,89	11,85	13,55	12,40	12,08	12,19	13,22	15,61	13,16	12,40
10	12,22	13,83	15,09	12,99	13,79	14,13	18,96	14,56	11,44	14,19	14,12	13,79
11	9,53	8,34	7,33	10,34	11,43	11,27	11,97	11,91	14,31	7,99	10,44	9,53
12	13,84	11,92	14,37	10,31	10,21	12,15	inf.	12,43	9,40	10,12	11,64	10,21
13	14,31	14,96	15,55	18,32	21,83	16,02	15,39	16,38	14,05	16,25	16,31	15,39
14	12,44	14,85	13,00	15,56	13,56	11,73	10,90	14,60	12,24	15,54	13,44	12,44
15	15,35	10,55	15,19	15,22	16,17	16,92	11,38	15,93	13,46	14,46	14,46	14,46
16	12,45	13,30	13,84	17,41	14,91	15,32	18,66	12,80	16,35	17,33	15,24	13,84
17	12,45	14,31	11,07	12,99	13,06	14,78	13,85	15,77	12,45	11,49	13,22	12,45
18	16,14	13,89	14,13	12,52	16,28	15,09	15,02	13,98	14,69	13,52	14,53	13,98
19	14,45	11,44	13,55	10,26	13,82	13,69	13,06	9,75	11,45	13,07	12,45	11,45
20	12,46	9,09	11,04	12,00	16,51	13,31	12,11	12,66	14,02	10,51	12,37	12,00
21	12,84	13,67	13,02	13,43	11,77	12,03	12,45	12,83	10,27	12,63	12,49	12,45
22	14,91	12,79	15,24	11,60	14,69	14,97	12,49	10,89	12,15	12,91	13,26	12,49
23	14,34	12,65	13,65	12,72	14,07	12,79	12,02	14,65	14,22	16,09	13,72	12,79
24	12,59	10,91	15,42	12,73	10,66	13,24	14,56	13,17	12,22	11,44	12,69	12,22
25	15,94	14,63	17,15	14,51	13,67	16,42	16,39	13,17	15,92	12,98	15,08	14,51
26	13,18	12,83	12,26	13,90	10,22	10,19	17,28	8,65	9,74	11,87	12,01	10,22
27	15,44	14,09	14,28	16,00	16,44	11,42	13,74	15,82	13,45	15,32	14,60	14,09
28	11,24	10,67	11,73	11,49	12,32	12,78	13,17	12,47	12,13	11,88	11,99	11,73
29	14,25	13,65	13,33	12,06	17,69	15,38	10,33	culot	12,81	17,79	14,14	12,81
30	hémolyse	12,76	15,23	11,52	17,65	14,71	16,25	hémolyse	19,65	16,98	15,59	14,71

Annexe 3 : Concentrations plasmatiques en cuivre individuelles des 300 vaches prélevées (*inf.* : Infection ou inflammation)

Elevage	Valeur individuelle du Cu plasmatique (µmol/l)										Moyenne	1 ^{er} Tercile
1	13,55	18,20	13,66	<i>culot</i>	12,34	10,28	12,87	12,67	<i>culot</i>	16,31	13,74	12,67
2	12,16	11,61	12,92	11,82	12,63	12,39	16,29	10,72	10,97	10,91	12,24	11,61
3	13,57	11,56	<i>culot</i>	15,74	14,94	13,81	15,16	14,48	12,59	12,59	13,83	12,59
4	10,71	10,83	15,72	13,74	12,36	7,35	10,92	10,30	11,55	9,92	11,34	10,71
5	8,45	10,32	10,51	10,97	16,02	10,38	<i>hémolyse</i>	<i>culot</i>	14,85	11,23	11,59	10,38
6	15,90	11,36	12,51	10,36	12,97	12,47	13,34	13,30	12,94	14,57	12,97	12,51
7	16,99	10,67	11,64	14,98	10,35	13,81	10,19	12,51	12,63	12,72	12,65	11,64
8	10,38	13,52	12,03	<i>culot</i>	12,81	14,56	15,28	11,71	9,69	12,12	12,46	11,71
9	11,07	9,46	17,66	11,10	15,65	19,37	13,34	16,28	13,82	14,34	14,21	13,34
10	10,23	14,03	15,55	9,96	18,11	19,36	12,86	17,39	13,52	16,77	14,78	13,52
11	16,36	11,69	12,00	10,24	13,32	13,88	10,94	10,35	14,05	12,00	12,48	11,69
12	14,55	13,32	15,81	12,72	14,31	13,73	<i>inf.</i>	14,11	12,76	13,74	13,89	13,32
13	9,13	18,74	14,67	14,12	16,11	22,73	18,00	12,93	14,25	20,11	16,08	14,25
14	12,56	9,48	11,98	13,23	14,42	11,18	13,34	14,96	11,80	11,28	12,42	11,80
15	10,06	9,35	10,83	14,33	12,56	12,10	12,11	9,63	8,38	13,82	11,32	10,06
16	9,42	12,12	8,52	10,08	13,17	9,61	10,65	13,57	11,88	9,67	10,87	9,67
17	14,35	11,76	10,63	14,43	10,55	11,00	10,49	12,55	9,32	12,25	11,73	10,63
18	9,31	11,44	10,86	8,78	10,19	10,75	10,61	12,80	11,06	11,44	10,72	10,61
19	11,90	8,15	9,92	13,77	12,85	9,08	10,53	14,70	10,90	12,74	11,45	10,53
20	8,74	7,64	9,47	8,34	12,09	11,84	11,95	12,35	10,76	9,95	10,31	9,47
21	12,45	11,13	9,56	12,39	11,43	9,00	10,38	8,93	9,58	8,59	10,34	9,56
22	12,48	11,04	11,25	8,87	12,61	11,07	10,10	9,17	9,85	9,33	10,58	9,85
23	10,79	12,16	10,84	10,54	12,53	12,23	11,76	12,54	11,50	11,69	11,66	11,50
24	7,86	9,99	11,59	15,96	8,99	11,17	10,89	13,75	9,10	9,06	10,84	9,10
25	9,96	10,07	3,66	12,79	16,68	16,22	15,05	9,06	12,15	13,21	11,89	10,07
26	15,41	15,41	16,55	15,37	15,50	14,23	12,23	15,80	16,62	13,07	15,02	15,37
27	14,85	16,23	18,20	14,22	13,59	21,79	15,14	12,72	13,71	15,43	15,59	14,22
28	21,15	10,64	9,83	10,25	9,62	14,47	10,57	11,33	13,39	18,93	13,02	10,57
29	16,58	15,72	12,87	13,30	14,40	13,35	13,05	<i>culot</i>	16,78	10,79	14,09	13,05
30	<i>hémolyse</i>	13,91	14,73	11,07	10,71	12,68	12,15	<i>hémolyse</i>	16,58	14,64	13,31	12,15

Annexe 4 : Activités de la GSH-pxe individuelles des 300 vaches prélevées

Elevage	Valeur individuelle de l'activité de la GSH-pxe (U/gHb)										Moyenne	1^{er} Tercile
1	106	99	284	84	107	78	54	69	113	147	114	84
2	218	67	215	87	189	243	183	290	217	103	181	183
3	134	56	144	114	151	150	112	129	156	147	129	129
4	42	59	56	51	73	38	34	113	92	63	62	51
5	396	410	501	489	524	422	515	532	492	459	474	459
6	80	47	20	35	20	45	53	32	40	55	43	35
7	51	106	143	115	123	206	192	185	127	191	144	123
8	78	70	56	59	87	104	84	20	41	93	69	59
9	132	77	210	233	140	134	189	179	264	173	173	140
10	273	297	400	316	303	397	328	358	265	333	327	303
11	111	135	160	85	142	158	51	121	90	132	119	111
12	165	169	82	249	79	178	231	219	115	151	164	151
13	192	179	122	121	42	226	104	44	118	81	123	104
14	149	127	146	118	145	123	104	118	46	86	116	118
15	174	97	164	144	198	204	88	151	145	141	151	144
16	51	141	143	148	65	202	180	75	130	146	128	130
17	56	97	129	66	93	83	82	82	37	27	75	66
18	73	71	31	65	192	77	90	199	37	20	86	65
19	139	114	123	146	142	127	99	88	142	96	122	114
20	146	106	87	135	69	189	176	197	56	194	136	106
21	22	41	20	27	24	20	20	47	30	20	27	20
22	80	27	31	65	67	39	80	24	64	41	52	39
23	38	20	53	49	77	108	44	75	75	61	60	49
24	103	47	137	56	80	71	61	61	166	85	87	61
25	30	20	36	30	20	43	53	38	32	39	34	30
26	106	258	184	177	36	51	27	60	81	31	101	51
27	218	428	242	337	313	372	443	339	261	274	323	274
28	518	551	318	410	274	228	271	277	202	190	324	271
29	137	141	313	264	447	291	380	247	335	290	285	264
30	435	345	211	423	464	344	381	367	404	320	369	345

Annexe 5 : Valeurs des complémentations en Zn, Cu et Se des 30 élevages

Complémentation en			réalisation d'une cure de chargement en oligoélément :	Quantité distribué en complément (en mg/Kg MS)			Quantité de Cu distribué corrigé (en mg/Kg MS) : + ration de base estimé au plus à 50% des apports recommandé en Zn et Cu et 20% en Se soit		
Zn :	Cu :	Se :		de Zn :	de Cu :	de Se :	25 en Zn :	5 en Cu :	0,02 en Se :
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	NON	60,6	17,3	0,350	85,6	22,3	0,370
Intermédiaire	Importante	Importante	OUI	23,4	10,9	0,270	48,4	15,9	0,290
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	OUI	14,3	3,4	0,071	39,3	8,4	0,091
Faible	Faible	Intermédiaire	NON	6,5	3,4	0,170	31,5	8,4	0,190
Importante	Importante	Importante	OUI	55,0	17,0	0,400	80,0	22,0	0,420
Faible	Faible	Faible	NON	0,0	0,0	0,000	25,0	5,0	0,020
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	OUI	0,0	0,0	0,000	25,0	5,0	0,020
Faible	Faible	Faible	NON	0,0	0,0	0,000	25,0	5,0	0,020
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	NON	101,4	15,6	0,310	126,4	20,6	0,330
Intermédiaire	Importante	Importante	OUI	21,6	13,0	0,190	46,6	18,0	0,210
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	OUI	15,2	3,6	0,076	40,2	8,6	0,096
Importante	Importante	Importante	OUI	60,7	17,3	0,350	85,7	22,3	0,370
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	NON	120,0	20,8	0,600	145,0	25,8	0,620
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	NON	17,3	3,5	0,035	42,3	8,5	0,055
Intermédiaire	Intermédiaire	Importante	OUI	14,7	1,7	0,110	39,7	6,7	0,130
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	OUI	10,4	2,5	0,052	35,4	7,5	0,072
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	OUI	0,0	0,0	0,000	25,0	5,0	0,020
Intermédiaire	Intermédiaire	Faible	NON	50,7	10,1	0,078	75,7	15,1	0,098
Importante	Importante	Importante	OUI	65,0	15,6	0,330	90,0	20,6	0,350
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	OUI	0,0	0,0	0,000	25,0	5,0	0,020
Faible	Faible	Faible	NON	0,0	0,0	0,000	25,0	5,0	0,020
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	NON	52,0	14,3	0,290	77,0	19,3	0,310
Faible	Faible	Faible	NON	17,0	2,8	0,070	42,0	7,8	0,090
Faible	Faible	Faible	NON	22,7	1,9	0,013	47,7	6,9	0,033
Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	NON	52,0	13,0	0,300	77,0	18,0	0,320
Faible	Faible	Faible	NON	24,2	4,5	0,030	49,2	9,5	0,050
Importante	Importante	Importante	OUI	54,0	12,4	0,210	79,0	17,4	0,230
Importante	Importante	Importante	OUI	78,0	14,0	0,270	103,0	19,0	0,290
Importante	Importante	Importante	OUI	130,0	23,4	0,450	155,0	28,4	0,470
Importante	Importante	Importante	OUI	103,7	19,5	0,360	128,7	24,5	0,380

NOM PREMON : TETU Camille

**TITRE : EVALUATION DU STATUT MINERAL DES BOVINS PAR LA
TECHNIQUE D'ANALYSE DES MINERAUX DANS LES POILS :
ETUDE EXPERIMENTALE SUR 30 ELEVAGES ALLAITANTS
CHAROLAIS**

Thèse d'Etat de Doctorat Vétérinaire : Lyon, le 04 octobre 2013

RESUME :

Les carences en oligo-éléments chez les bovins peuvent être responsables d'une baisse des performances zootechniques et de troubles de santé majeurs, ce qui revêt une importance économique non négligeable pour les élevages. Plusieurs méthodes existent afin d'estimer le statut nutritionnel pour un oligoélément chez les bovins dont le dosage d'oligoélément dans les poils. Cependant, les données bibliographiques concernant la validation de cette méthode sont très contradictoires.

Nous avons réalisé une étude afin d'évaluer la méthode de détermination du statut nutritionnel en oligo-éléments d'un troupeau par le dosage du Zinc, du Cuivre et du Sélénium dans les poils. Des dosages pilaires, des dosages sanguins et une analyse des pratiques d'alimentation minérale ont été réalisés sur 30 élevages bovins allaitants de race charolaise. La comparaison de ces trois méthodes montre que:

- 1) Les teneurs en Zinc et en Sélénium des poils ne reflètent pas la quantité de complémentation respectivement en Zinc et Sélénium distribués aux bovins. La concentration pileire en Cuivre présente une relation positive, bien que faible, avec la quantité de complémentation en Cu réalisée sur les bovins.
- 2) Les concentrations pilaires en Zinc, Cuivre et Sélénium ne présentent aucune relation avec les dosages sanguins respectifs.
- 3) La concentration pileire en Zinc semble être significativement modifiée par le zinc contenu dans l'environnement.

Ainsi, au vue des données bibliographiques et des résultats de notre étude, le dosage des oligo-éléments dans les poils ne fournit pas des résultats permettant d'objectiver le statut nutritionnel des bovins.

MOTS CLES :

- Bovins
- Système pileux
- Teneur en oligoéléments
- Nutrition

JURY :

Président :	Monsieur le Professeur Claude GHARIB
1er Assesseur :	Monsieur le Professeur Laurent ALVES DE OLIVEIRA
2ème Assesseur :	Monsieur le Professeur Denis GRANCHER

DATE DE SOUTENANCE : Le 4 Octobre 2013

ADRESSE DE L'AUTEUR :

La Croix Marçais
03370 Saint Désiré