

ECOLE NATIONALE VETERINAIRE D'ALFORT

Année 2002

ANALYSES PILAIRES MINERALES

CHEZ LE CHIEN ET LE CHAT

THESE

pour le

DOCTORAT VETERINAIRE

présentée et soutenue publiquement
devant

LA FACULTE DE MEDECINE DE CRETEIL

le

par

Sandrine, Suzanne, Madeleine DENIAU

Née le 15 janvier 1977 à Carthage (Tunisie)

JURY

Président : M.

Professeur à la Faculté de Médecine de CRETEIL

Membres

Directeur : M. PARAGON

Professeur à l'E.N.V.A.

Assesseur : M. GUILLOT

Maître de conférence à l'E.N.V.A.

REMERCIEMENTS

Pour avoir proposé ce sujet intéressant et pour m'avoir aidé à le réaliser concrètement, je tiens à remercier l'équipe de Royal Canin et plus particulièrement Monsieur Philippe Pierson. Je remercie la DGER pour son aide financière, ainsi que Monsieur et Madame Poirier pour avoir aimablement répondu à toutes mes questions et pour m'avoir permis de réaliser toutes les analyses dans leur laboratoire. J'adresse un grand merci à Christophe Arvy et aux autres membres de la clinique vétérinaire de Libourne pour avoir su me donner motivation et ambition quand à la réalisation de ce travail de thèse. Je remercie aussi Jean-Pierre Valette qui, patiemment et gentiment, a pris le temps de m'expliquer les méthodes statistiques de traitement des données avant de les appliquer avec moi. Pour finir, je remercie Monsieur Paragon qui m'a suivi tout au long de ce travail et a su me remettre chaque fois sur le bon chemin. Je remercie enfin mon futur époux pour la patience et la compréhension dont il a su faire preuve...

PLAN DE L'ETUDE

INTRODUCTION GENERALE	9
PREMIERE PARTIE : LES POILS DE CARNIVORES DOMESTIQUES ET L'ANALYSE PILAIRE	11
I STRUCTURE DES POILS	11
A Constitution d'un poil de carnivore	11
1. Tige pilaire	12
2. Annexes du poil	13
3. Follicule pileux	15
B Types de poils présents chez les carnivores	15
1. Catégories de follicules	15
2. Association de poils	17
3. Importance	18
4. Conclusion	19
C Pigmentation des poils des carnivores	19
D Conclusion	21
II CYCLE PILAIRE	23
A Différentes phases	24
1. Phase anagène	24
2. Phase catagène	26
3. Phase télogène	28
4. Initiation d'un nouveau cycle	28
B Déterminisme	29
1. Cellules germinales	29
2. Interactions entre cellules de nature différente	30
3. Médiateurs en cause	31
4. Conclusion	31
C Facteurs de variation	31
1. Variations individuelles	32
2. Variations saisonnières	33
3. Variations hormonales	34
4. Conclusion	35
D Conclusion	36
III ANALYSE PILAIRE	39
A Eléments mesurés	39
1. Oligo-éléments dans la structure des poils	40
2. Sources de contamination	41
3. Facteurs de variation	41
4. Conclusion	41
B Préparation de l'échantillon de poils	43
1. Nettoyage de l'échantillon	43
2. Mise en cendres de l'échantillon	43
3. Conclusion	44
C Différentes méthodes	44
1. Méthodes sans destruction préalable de l'échantillon	44
2. Méthodes avec destruction préalable de l'échantillon	45
3. Autres méthodes	46

4. Conclusion sur les différentes méthodes d'analyse	47
<i>D Conclusion</i>	47
DEUXIEME PARTIE : RAPPEL SUR LA PLACE DES MINERAUX EN BIOLOGIE	49
I ALUMINIUM	49
II CADMIUM	49
<i>A Absorption et répartition</i>	49
<i>B Syndrome d'intoxication</i>	50
III CALCIUM	51
<i>A Absorption et répartition</i>	51
<i>B Rôles</i>	51
<i>C Syndrome de carence</i>	51
<i>D Syndrome d'intoxication</i>	52
IV CHROME	52
<i>A Absorption et répartition</i>	52
<i>B Rôles</i>	52
<i>C Syndrome de carence</i>	53
<i>D Syndrome d'intoxication</i>	53
V COBALT	53
VI CUIVRE	54
<i>A Absorption et répartition</i>	54
<i>B Rôles</i>	54
1. Biochimiques	54
2. Physiologiques	55
<i>C Syndrome de carence</i>	55
<i>D Syndrome d'intoxication</i>	56
1. Accumulation du Cuivre dans le foie	56
2. Toxicité gastro-intestinale	56
3. Toxicité sanguine	57
4. Toxicité rénale	57
VII FER	57
<i>A Absorption et répartition</i>	57
<i>B Rôles</i>	57
<i>C Syndrome de carence</i>	58
<i>D Syndrome d'intoxication</i>	58
VIII MAGNESIUM	58
<i>A Absorption et répartition</i>	58
<i>B Rôles</i>	59
1. Biochimiques	59
2. Physiologiques	59
<i>C Syndrome de carence</i>	59
<i>D Syndrome d'intoxication</i>	60
IX MANGANESE	60
<i>A Absorption et répartition</i>	60
<i>B Rôles</i>	60
<i>C Syndrome de carence</i>	61
<i>D Syndrome d'intoxication</i>	61
X MERCURE	62
XI NICKEL	62
XII PLOMB	62
XIII SELENIUM	63

<i>A Absorption et répartition</i>	63
<i>B Rôles</i>	63
<i>C Syndrome de carence</i>	64
<i>D Syndrome d'intoxication</i>	64
XIV ZINC	64
<i>A Absorption et répartition</i>	64
<i>B Rôles</i>	64
<i>C Syndrome de carence</i>	65
<i>D Syndrome d'intoxication</i>	65
TROISIEME PARTIE : ELEMENTS MINERAUX ET ANALYSES PILAIRES CHEZ LE CHAT : ETUDE EXPERIMENTALE	67
INTRODUCTION	67
I MATERIEL ET METHODES	67
<i>A Les animaux</i>	67
<i>B Les prélèvements</i>	68
<i>C Le traitement au laboratoire</i>	68
<i>D La méthode d'analyse des résultats</i>	70
1. Etablissement de normes	70
2. Etude des facteurs de variation	70
II RESULTATS	70
<i>A Etablissement de normes</i>	70
1. Moyennes	70
2. Ecart types	71
3. Intervalles de confiance	73
<i>B Etude du paramètre «année de prélèvement» :</i>	73
<i>C Etude du facteur «mode de prélèvement» :</i>	76
III DISCUSSION	78
<i>A Norme de référence</i>	78
<i>B Année de prélèvement</i>	80
<i>C Mode de prélèvement</i>	80
1. Comparaison de moyennes	80
2. Comparaison d'intervalles	81
IV CONCLUSION	81
QUATRIEME PARTIE : MINERAUX PILAIRES CHEZ LE CHIEN : ETUDE EPIDEMIOLOGIQUE	83
INTRODUCTION	83
I LES MINERAUX CHEZ LE CHIEN	84
<i>A Carence en Calcium chez le chien</i>	84
<i>B Cuivre chez le chien</i>	84
1. Syndrome de carence	84
2. Syndrome d'intoxication	84
<i>C Carence en Fer chez le chien</i>	85
<i>D Carence en Sélénium chez le chien</i>	85
<i>E Zinc chez le chien</i>	85
1. Syndrome de carence	85
2. Syndrome d'intoxication	86
II MATERIEL ET METHODES	87
<i>A Les animaux</i>	87
<i>B Prélèvement et analyse des poils</i>	90

<i>C Analyse des données</i>	90
1. Animaux sains	90
2. Animaux malades	91
III RESULTATS	92
<i>A Animaux sains</i>	92
1. Normes de résultats	92
2. Facteurs de variation	96
<i>B Animaux malades</i>	106
1. Analyse factorielle discriminante	106
2. Analyse de variance	116
IV DISCUSSION	123
<i>A Animaux sains</i>	123
1. Sexe	123
2. Couleur des poils	123
3. Lot	124
4. Alimentation	124
5. Race	125
<i>B Corrélations entre oligo-éléments</i>	125
<i>C Animaux malades</i>	126
1. Aluminium	127
2. Cobalt	127
3. Cuivre	127
4. Fer	128
5. Mercure	128
6. Nickel	129
7. Plomb	129
8. Sélénium	130
9. Zinc	130
V CONCLUSION	131
CONCLUSION GENERALE	133
ANNEXES	135
BIBLIOGRAPHIE	143

FIGURES

<i>Figure 1 : Agencement des poils au sein de l'épiderme</i>	11
<i>Figure 2 : Coupe transversale d'un poil</i>	12
<i>Figure 3 : Annexes d'un poil de carnivore</i>	13
<i>Figure 4 : Follicule anagène</i>	14
<i>Figure 5 : Follicule primaire</i>	16
<i>Figure 6 : Follicule secondaire</i>	17
<i>Figure 7 : Association de follicules</i>	18
<i>Figure 8 : Poil agouti</i>	20
<i>Figure 9 : Représentation simple du cycle pilaire</i>	23
<i>Figure 10 : Les étapes de la phase anagène</i>	25
<i>Figure 11 : Follicule catagène</i>	27
<i>Figure 12 : Initiation d'un nouveau cycle</i>	29
<i>Figure 13 : Intervention des hormones dans le déroulement du cycle pilaire</i>	36
<i>Figure 14 : Les poils reflètent les flux en oligo-éléments de l'organisme entier</i>	42
<i>Figure 15 : Méthode d'analyse</i>	69

TABLEAUX

Tableau I :	Moyennes et écart types obtenus sur l'ensemble des chats sains	72
Tableau II :	Comparaison entre les intervalles de confiance de concentration pilaire obtenus sur nos chats sains et ceux utilisés par le laboratoire SEROM	74
Tableau III :	Moyennes des concentrations pilaires +/- écart type pour chaque élément en fonction de l'année de prélèvement chez le chat	75
Tableau IV :	Moyennes des concentrations pilaires +/- écart type pour chaque élément en fonction du type de prélèvement chez le chat	77
Tableau V :	Intervalles de confiance mesurés selon le mode de prélèvement et normes utilisées par le laboratoire	79
Tableau VI :	Répartition des 113 chiens au sein des 9 catégories de maladies	88
Tableau VII :	Répartition des 57 chiens sains	89
Tableau VIII :	Résultats obtenus sur les 57 chiens sains	93
Tableau IX :	Comparaison entre les intervalles de confiance de concentration pilaire obtenus sur nos chiens sains, sur nos chiens malades et ceux utilisés par le laboratoire SEROM	95
Tableau X :	Moyennes de concentration pilaire en fonction du sexe du chien	97
Tableau XI :	Moyennes de concentration pilaire des caniches en fonction de la couleur de leurs poils	98
Tableau XII :	Moyennes de concentrations pilaires selon l'élevage du chien	99
Tableau XIII :	Moyennes pilaires en fonction de l'alimentation du chien	100
Tableau XIV :	Moyennes de concentration pilaire de 57 chiens en fonction de leur race	103
Tableau XV :	Résultats obtenus sur les 113 chiens malades	108
Tableau XVI :	Corrélations entre les oligo-éléments pilaires au sein du groupe des chiens malades versus celui des chiens sains	113
Tableau XVII :	Importance de chacun des oligo-éléments dans la différence entre maladies	115
Tableau XVIII :	Moyennes en oligo-élément en fonction de la maladie	119
Tableau XIX :	Résultats obtenus sur l'ensemble des chiens	120

ABREVIATIONS

Al :	Aluminium
Cd :	Cadmium
Ca:	Calcium
Cr:	Chrome
Co:	Cobalt
Cu:	Cuivre
Fe:	Fer
Mg:	Magnésium
Mn:	Manganèse
Hg:	Mercure
Ni :	Nickel
Pb :	Plomb
Se :	Sélénium
Zn :	Zinc

Introduction générale

Le poil est une annexe cutanée kératinisée. C'est l'un des seuls supports organiques permettant une analyse chimique a-traumatique. Les mesures en oligo-éléments ont montré des concentrations relativement élevées dans les poils par rapport au reste de l'organisme. Le statut minéral des êtres vivants étant difficile à explorer par ailleurs, les recherches se sont tournées vers l'analyse pilaire minérale. Mais est-ce un outil intéressant ?

L'analyse pilaire est un examen complémentaire de réalisation simple. Le prélèvement est très stable, ne pose aucun problème de conservation. Ce type d'analyse est facilement réalisable en pratique. Malheureusement, la variabilité des résultats est à l'origine d'une grande difficulté d'interprétation.

Cette étude a été menée dans le but de rendre les résultats d'analyses pilaires minérales interprétables par le vétérinaire urbain. Pour cela, il faut disposer de normes et connaître les principaux facteurs de variation des concentrations pilaires. La méthode de prélèvement, certains facteurs extérieurs, la ration et le statut physiologique de l'animal ont-ils une influence? Les réponses nous donnerons les clés de l'interprétation des concentrations pilaires minérales. Alors, nous pourrons savoir si l'analyse pilaire est un outil de diagnostic valable chez le chien et le chat.

Afin d'aborder cette étude, les recherches ont porté sur les poils des carnivores domestiques puis sur les modes de dosage des minéraux. Ensuite, l'importance des éléments concernés a été détaillée. Enfin, deux études expérimentales ont été effectuées, l'une sur des chats et l'autre sur des chiens. Leur but était d'établir des résultats normaux et de connaître certains facteurs de variation.

Afin de mieux connaître le support de nos recherches, la première partie commence par une étude approfondie du poil des carnivores domestiques. Les méthodes d'analyse utilisables sont ensuite détaillées et critiquées afin de justifier notre choix.

L'étude physiologique des poils de carnivore montre que la synthèse du poil peut être différente selon des facteurs propres à l'animal (âge, sexe, race) ou selon leur couleur. Es-ce que ces différences de structure se retrouvent dans la composition chimique du poil ? Des oligo-éléments sont-ils plus concentrés dans certaines conditions ? Autant de questions auxquelles nous tenterons de répondre ensuite par l'expérimentation.

La deuxième partie contient une étude générale des oligo-éléments mesurés dans le poil. La connaissance de leurs rôles métaboliques peut sans doute aider à l'interprétation de leur concentration pilaire.

Les 14 minéraux analysés classiquement dans les poils sont de deux sortes. Deux macro-éléments (Calcium, Magnésium) et une majorité d'oligo-éléments (Manganèse, Chrome, Sélénium) se distinguent par leur teneur globale dans l'organisme. Les poils fixent aussi les métaux lourds circulant (Cadmium, Plomb, Aluminium, Mercure). Le poil affiche même une concentration en éléments présents à l'état de « trace » dans l'organisme, comme le Nickel et le Cobalt. Les rôles métaboliques de ces éléments sont le plus souvent nombreux (Cuivre, Zinc, Fer).

L'étude expérimentale relatée dans la troisième partie a été réalisée sur des chats sains dans le but d'établir des moyennes de résultats et de déterminer l'importance du procédé de prélèvement.

Pour que l'analyse pilaire soit interprétable en pratique chez le chat, il faut connaître la normalité. L'expérimentation concerne 11 chats parfaitement sains. Sont testés l'influence du mode de prélèvement et de l'année de prélèvement sur les résultats obtenus. Le procédé utilisé et sa période d'application sont-ils des sources de variation?

La quatrième et dernière partie concerne le chien. Les signes spécifiques associés à des déséquilibres minéraux sont tout d'abord rappelés. Puis l'étude expérimentale est exposée. Elle concerne 57 chiens sains et 113 chiens malades.

De nombreuses analyses pilaires avaient été réalisées antérieurement à cette étude dans le cadre d'une clientèle vétérinaire, sur des chiens atteints de maladies diverses. Aucune conclusion pratique n'en avait été dégagée. Devant cette quantité d'informations, un tri et une étude statistique étaient nécessaires. Le prélèvement d'un lot de chiens témoins s'est révélé indispensable comme base de comparaison.

Le lot des chiens sains a tout d'abord été étudié afin d'établir des normes de résultats, comparées ensuite aux valeurs couramment admises.

Ce lot de 57 chiens a permis aussi de déterminer l'influence de certains facteurs évoqués dans la physiologie pilaire. Nous avons relevé la race, le sexe, la couleur, l'alimentation et l'élevage d'origine des chiens prélevés. Nous avons donc pu tester ces différents éléments.

Par ailleurs, le lot des chiens témoins a été comparé aux chiens malades, afin de mettre en évidence des différences objectives. Les résultats pilaires sont-ils significativement différents lorsque le chien est malade ? Y a-t-il des différences selon la maladie ? L'analyse pilaire est-elle utilisable comme outil diagnostique ? Tels étaient les objectifs de cette étude épidémiologique.

Première partie : LES POILS DE CARNIVORES DOMESTIQUES ET L'ANALYSE PILAIRE

La majorité de la surface de la peau des carnivores domestiques est abondamment couverte de poils (67). Ces phanères complètent les fonctions de l'épiderme. Ils permettent une thermorégulation corporelle plus fine et une perception sensorielle accrue. Par ailleurs, le pelage forme une barrière mécanique avec le milieu, plus ou moins efficace selon sa qualité (4). Le pelage est aussi une protection contre les agents chimiques et microbiens susceptibles d'attaquer la peau sous jacente (100).

Nous aborderons dans un premier temps la structure du poil, sa morphologie et sa constitution. Puis nous tenterons d'expliquer la croissance et le renouvellement de ces phanères, en décrivant le cycle pilaire. Enfin, afin d'introduire la suite du travail, nous mettrons en évidence l'intérêt du poil en guise de support d'analyse. Les différentes méthodes utilisées aujourd'hui seront brièvement décrites.

I Structure des poils

Le poil de carnivore a une constitution cellulaire connue. Mais tous les poils d'un même animal ne sont pas identiques : longs ou courts, durs ou souples, droits ou ondulés. Il est intéressant de voir comme la fonction d'un poil est intimement liée à sa forme. Couleur et qualité du pelage savent s'adapter aux conditions climatiques.

A Constitution d'un poil de carnivore

Les poils sont des annexes de la peau poussant obliquement par rapport à sa surface, mais parallèles entre eux (2, 101). (figure 1)

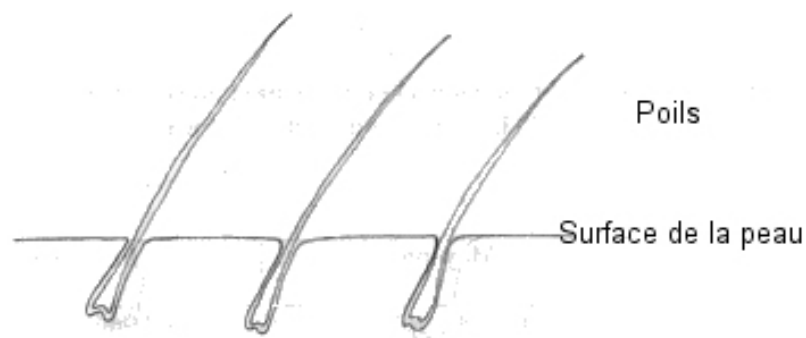


Figure 1 : Agencement des poils au sein de l'épiderme (7)

Morphologiquement, le poil possède deux parties : une tige libre, visible à la surface de la peau et une racine, dans l'épaisseur du tégument. La description en est faite ici en phase anagène, période où le poil est mature, sa croissance terminée.

1. Tige pileaire

L'ensemble de la tige pileaire est constitué de trois parties : médulla, cortex et cuticule, bien illustrées sur une coupe transversale de poil (figure 2).

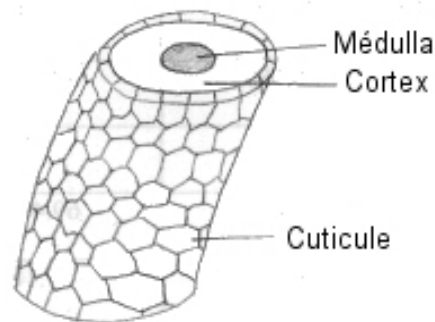


Figure 2 : Coupe transversale d'un poil (63)

*La moelle, centrale, est constituée de cellules peu kératinisées et vacuolisées, cuboïdales, s'aplatissant progressivement avec le temps (4). Elle est plus large au sein des poils de couverture (8). Elle est absente du sous-poil (100).

*Le cortex est formé de cellules fusiformes (4), très kératinisées, dans l'axe du poil (52).

*La cuticule ou épidermicule est une couche de cellules anucléées, cornifiées agencées comme les tuiles d'un toit (62), le bord libre vers la pointe du poil (4). Elle s'entoure de deux gaines dans la partie cachée du poil. Son rôle essentiel est la protection du cortex sous-jacent contre les agressions extérieures (63). Son épaisseur est supérieure au sein des poils secondaires (100).

*L'épicuticule est une couche externe amorphe formée par les sécrétions exocellulaires des cellules cuticulaires (100).

La partie visible du poil est biologiquement morte. L'intégrité de ses propriétés physiques est due à des liens intercellulaires forts par l'intermédiaire de protéines de structure spécialisées (63).

2. Annexes du poil

Le poil est le plus souvent associé à des glandes sudoripares et sébacées mais aussi à un muscle dit arecteur. La figure 3 montre ces différentes structures.

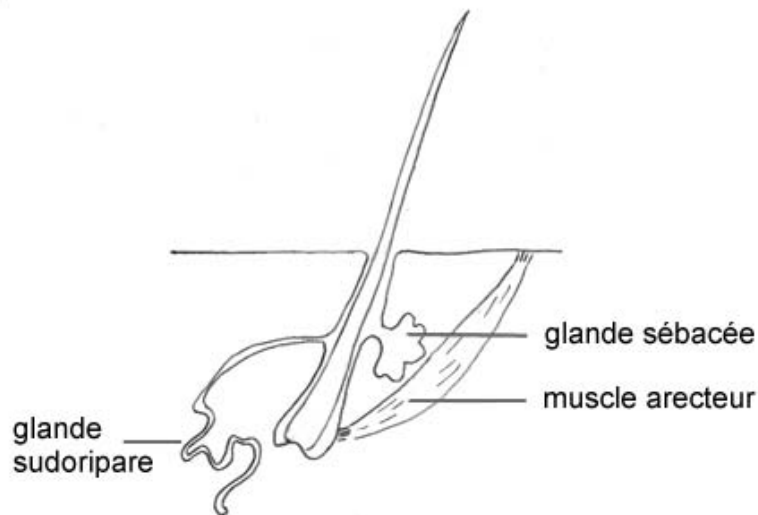


Figure 3 : Annexes d'un poil de carnivore (86)

Le muscle « arector pili » est lisse, il se contracte de façon involontaire. En se contractant, il permet le redressement du poil. Sur l'ensemble du pelage, ce phénomène emprisonne une grande quantité d'air sous les poils et diminue la perte de chaleur par conduction à partir de la peau. Par ailleurs ce mécanisme a un rôle comportemental, essentiellement chez le chat qui va ainsi augmenter son volume corporel apparent afin d'intimider l'adversaire. La contraction de ce muscle permet la vidange des glandes sébacées d'après Scott et al (101).

Les glandes sébacées associées aux poils sont des structures alvéolaires simples (106). Les glandes sudoripares sont simples, tubulaires, à sécrétion apocrine. Elles s'abouchent au même niveau que les glandes sébacées dans le canal pilaire (7). Ces glandes sont primitivement produites à partir du poil en formation (7).

Leurs sécrétions assurent principalement trois rôles. Le premier concerne la lubrification des poils, afin qu'ils puissent glisser facilement les uns contre les autres (86). D'après Lloyd et Garthwaite (64), les poils sont liés les uns aux autres par le matériel amorphe constitué par les lipides des sécrétions sébacées. Lors de maladie ou de malnutrition, le pelage peut sembler sec et rêche. La glande sébacée ne fonctionne alors pas correctement (101). Les molécules excrétées peuvent aussi servir la thermorégulation et la communication chimique avec les congénères (33).

Ces structures associées à la racine du poil permettent sa délimitation en 3 sections (100). L'infundibulum va de la surface de l'épiderme au départ de la glande sébacée. L'isthme va de l'abouchement de la glande sébacée à l'insertion du muscle arrecteur. Enfin, toute la partie inférieure ou bulbe pileux, est une région renflée autour de la papille dermique (5). Ces trois zones sont annotées sur la figure 4.

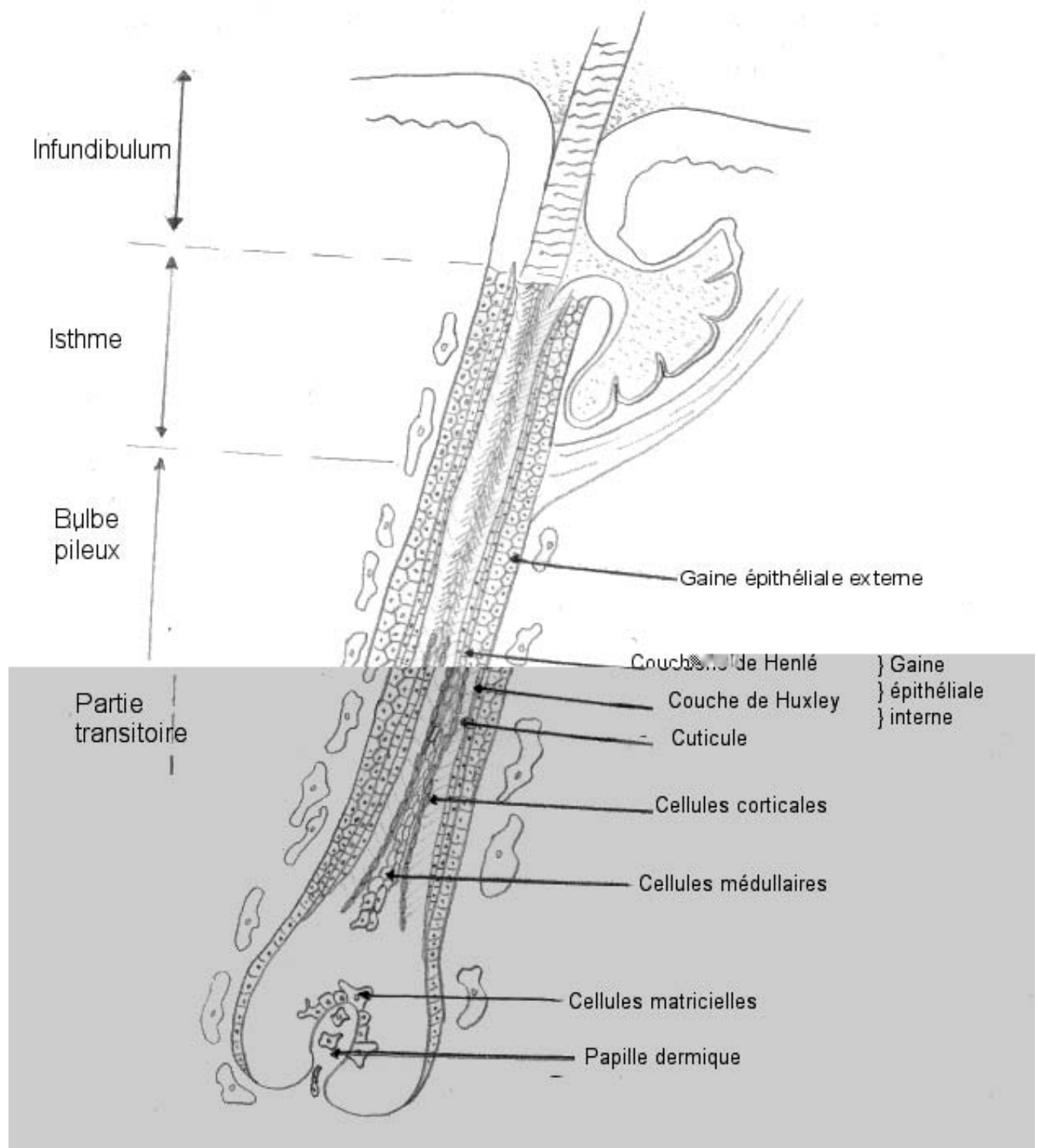


Figure 4 : Follicule anagène (5)

3. Follicule pileux

La racine du poil est comprise dans un follicule pileux, détaillé sur la figure 4. Le poil y est successivement entouré d'une gaine épithéliale interne, d'une gaine épithéliale externe, toutes deux d'origine épidermique. Enfin, une gaine fibreuse accessoire contenant la membrane basale contourne l'ensemble du follicule, liée à sa base à la papille dermique.

*La gaine épithéliale interne sert de moule au poil et s'étend jusqu'à la limite supérieure de l'isthme. Au-delà, elle se kératinise et disparaît (100). Cette gaine comporte en face interne une cuticule dont les cellules sont imbriquées avec les cellules cuticulaires du poil. Les couches de Huxley et de Henlé, plus externes, sont de nature filamenteuse (4).

*La gaine épithéliale externe comporte trois parties distinctes correspondant aux trois zones précédemment décrites (5). A deux assises cellulaires en région du bulbe, elle s'épaissit puis se kératinise au sein de l'isthme, lorsqu'elle n'est plus couverte de la gaine interne (100). Enfin, dans la zone de l'infundibulum, cette enveloppe prend l'aspect d'un épithélium malpighien.

*La membrane basale borde extérieurement la gaine précédente. Dans le tiers inférieur du follicule, cette membrane est entourée de deux couches de fibres de collagène. La plus interne a ses fibres parallèles à l'axe du poil. L'externe a ses fibres perpendiculaires à cet axe (4).

*La papille dermique est en continuité avec le conjonctif dermique. Elle est recouverte de cellules matricielles importantes pour la synthèse des cellules de la médulla et du cortex du poil, mais aussi de la gaine épithéliale interne. La taille de la papille détermine la taille du follicule donc celle du poil à venir (5).

B Types de poils présents chez les carnivores

A l'œil nu, nous distinguons, dans le pelage de nos carnivores domestiques des poils de forme différente. Des longs poils sont à la surface alors que le sous poil semble beaucoup plus petit et fin. Ces deux types de poil sont élaborés par des follicules de nature différente. Il existe trois types distincts de poils chez le chien et le chat. L'intérêt de ces différences sera détaillé dans la troisième partie.

1. Catégories de follicules

Le poil principal est issu d'un follicule primaire de grande taille, implanté profondément dans le derme (8), et associé à deux glandes sébacées, une glande sudoripare et un muscle arrecteur. Ce poil est épais, droit et sa pointe est fine. Il est représenté sur la figure 5.

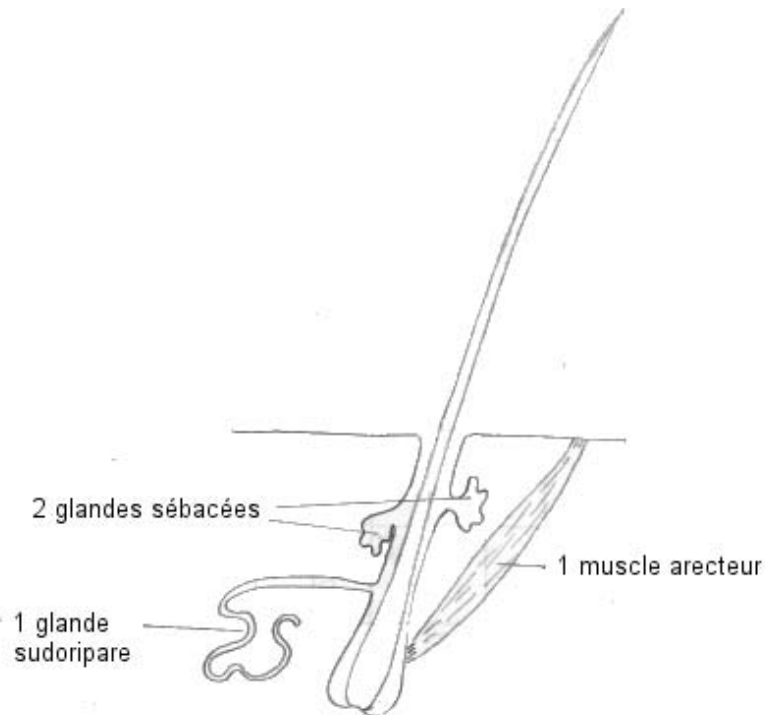


Figure 5 : Follicule primaire (62)

Les poils latéraux sont formés par des follicules primaires plus petits, entourant le follicule du poil principal. Seules deux glandes sébacées leur sont associées. Ces poils sont plus fins et possèdent un renflement après la (101).

L'ensemble forme les poils de couverture, longs et raides (52), tous issus de follicules primaires. Ils peuvent être hérissés pour augmenter l'épaisseur du pelage donc son pouvoir isolant. La pilo-érection est à l'origine d'une variation importante des possibilités de gain de chaleur (22). Ils sont imperméables. La terminaison de plusieurs neurones sensibles autour de leur follicule les rend sensitifs (33).

Le sous poil est plus fin, parfois ondulé. Son follicule, dit secondaire, n'est associé qu'à une glande sébacée (101). C'est ce qu'illustre la figure 6. Sa taille est quasiment identique à celle du follicule primaire des poils latéraux (98). Remarquons que le follicule détermine seul la qualité raide ou frisée du poil correspondant (101). Des variations de vitesse de croissance et de kératinisation de part et d'autre du poil donnent, d'après Scott (100), des poils frisés.

Ce sous-poil, laineux, très flexible est court (52). Contrairement aux poils de couverture, la longueur de ces poils secondaires est relativement variable (18). Le sous-poil est le principal outil de l'isolation thermique, très important chez les animaux vivant dans des conditions extrêmes (108).

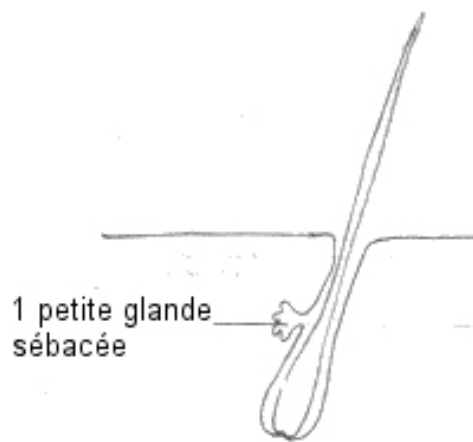


Figure 6 : Follicule secondaire (86)

2. Association de poils

Chez les carnivores domestiques, dès la maturité sexuelle, les follicules sont groupés (67), comme le représente la figure 7. Un follicule primaire central est encadré de deux (parfois plus) follicules primaires latéraux, chacun ayant un orifice de sortie indépendant (100). Cinq à vingt-cinq poils secondaires leurs sont associés (5). Ces petits poils, quant à eux, partagent le même orifice de l'épiderme (7, 106).

Les poils secondaires sont bien plus nombreux que les poils primaires, le ratio variant selon la localisation sur le corps. Baker (7) trouve 10 poils laineux pour un long poil sur la ligne du dos, et 24 pour 1 dans la région ombilicale. Les poils sont d'autant plus nombreux au sein d'un complexe que les poils morts persistent (18).

Les poils des chats sont arrangés en groupes de 2 à 5 poils de couverture. Dorsalement au corps de l'animal, les associations de poils sont nombreuses (8 à 9 par mm²), chacune ne contenant que 2 ou 3 poils principaux. Ventralement et aux extrémités basses, les poils, moins nombreux, se trouvent plutôt par groupes de 4 à 5. S'y associent 6 à 12 poils secondaires (106).

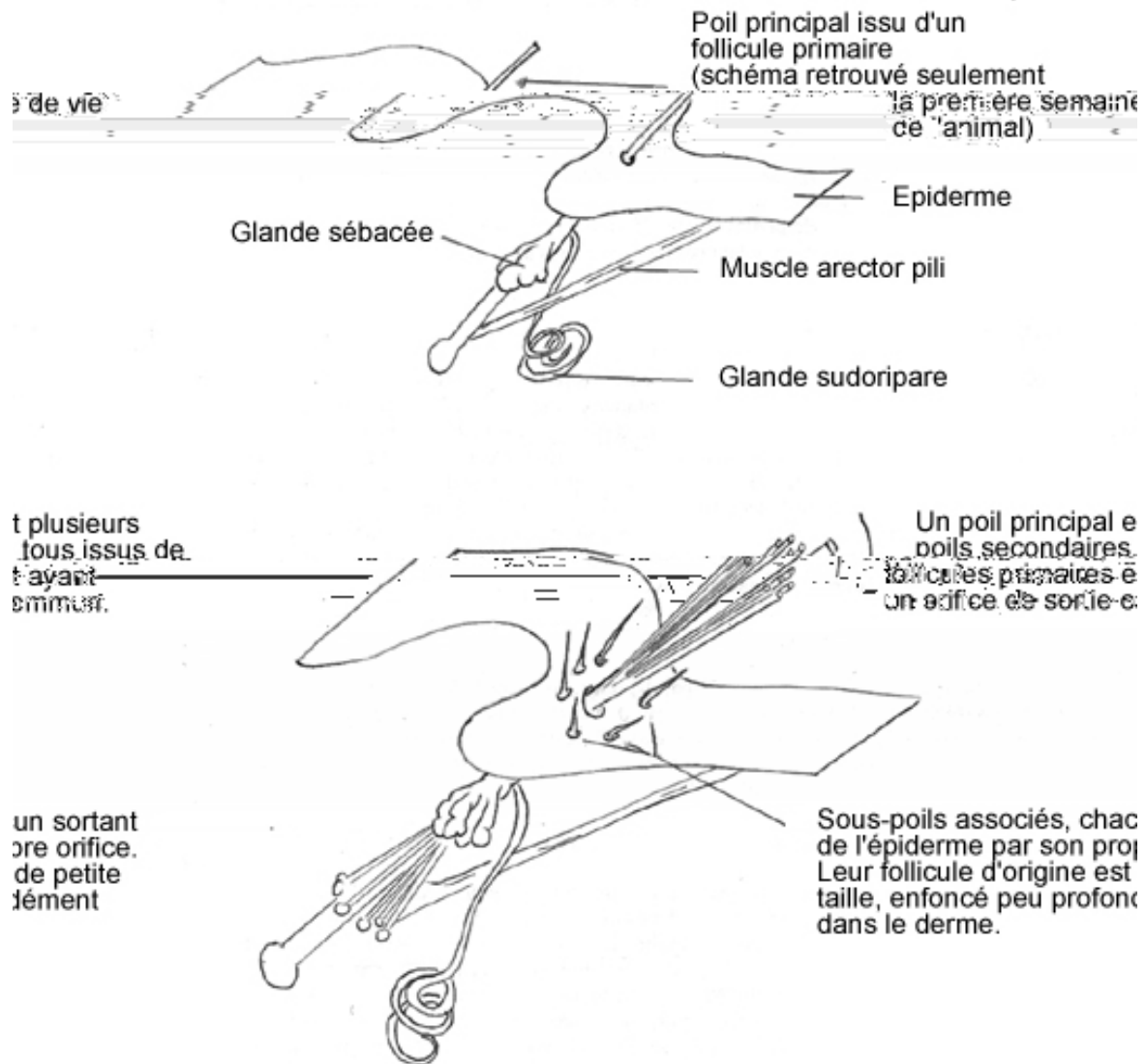


Figure 7 : Association de follicules (67)

3. Importance

75% de la perte de chaleur est attribuée aux phénomènes de radiation, conduction et convection. L'importance de chacun de ces mécanismes dépend de la température extérieure, de l'humidité, mais aussi des réponses du pelage de l'animal (101).

Le poil forme une enveloppe protectrice à l'origine d'une homéostasie efficace. La structure du pelage est un élément d'importance pour le gain de chaleur (22).

L'isolation thermique et sa régulation sont plus ou moins efficaces selon les qualités du poil : sa longueur, son épaisseur, sa densité (100). La longueur d'un phanère varie selon son type (couverture ou sous-poil), sa localisation à la surface du corps (tête versus queue). La génétique de l'animal (boxer versus colley) et son âge (98) interviennent aussi. Plus le poil est long, plus son érection est efficace pour augmenter la profondeur du pelage. L'air chaud emprisonné dans le pelage limite la perte de chaleur à partir de la peau (100). La pilomotricité met en échec les pertes de chaleur par conduction à partir de la peau (101).

L'épaisseur, la densité (nombre de poils par unité de surface) et la fourniture du pelage seront aussi des facteurs déterminant sa capacité d'isolation (101).

Le poil adapté à l'hiver est long, fin, son espace médullaire est de petit diamètre (100). L'ensemble est riche en sous poil laineux (40). Le pelage adapté à l'été est moins fourni, les follicules secondaires ayant involué en partie à la mue de printemps. Le poil est alors plutôt court, épais avec une médulla plus importante (100).

4. Conclusion

Il existe 3 catégories de follicules à l'origine de 2 classes de poils. La première classe constituée par les poils de couverture, assure l'imperméabilité et régule l'épaisseur du pelage. La deuxième classe ou sous-poil, est la principale responsable de la qualité isolante de la robe.

C'est l'ensemble qui sera à l'origine d'un pelage intègre et adapté, protégeant l'animal contre les intempéries de la saison en cours. Les phénomènes adaptatifs concernant la longueur du pelage et sa densité sont intéressants pour la thermorégulation (100).

C Pigmentation des poils des carnivores

Il existe chez nos carnivores domestique une grande variété de couleurs de robes. C'est l'élément esthétique le plus apprécié par le propriétaire, qui rend chaque animal unique. La couleur du pelage est un caractère défini génétiquement, mais qui peut subir de petites variations en fonction du milieu.

La coloration du poil est issue du dépôt de pigments dans les cellules de la moelle ou du cortex (52). Seul le cortex va donner sa coloration au poil (101). Deux types de pigment existent : l'eumélanine colore en brun ou en noir ; la phéomélanine colore en blond ou en roux (63). Les mélanocytes synthétisent ces pigments au sein d'organites appelés mélanosomes. L'intensité de la coloration dépend du nombre de mélanocytes présents et actifs autour de la papille (34).

Ces cellules sont présentes en grande quantité dans le bulbe pileux (10 fois plus que dans l'épiderme), en contact avec le milieu intercellulaire fournissant la matière première (5). Les cellules matricielles entourant la papille élaborent les kératinocytes du poil.

De longs bras cytoplasmiques des mélanocytes vont jusqu'au contact de ces kératinocytes nouvellement formés pour une incorporation directe des mélanosomes (8). Les mélanosomes étant de grande taille, un seul suffit à la coloration d'une cellule (5).

Les mélanocytes associés à un follicule synthétisent un seul pigment, déterminé génétiquement, à un moment donné (63). Les poils se succédant au niveau d'une même papille dermique auront la même couleur (7). Mais un complexe folliculaire peut être composé de poils de couleurs différentes (8).

Les poils agouti, présent notamment chez les chats à robe tabby (8), se caractérisent par une alternance de bandes foncées et claires sur toute la longueur de la tige pileuse. Sont formées successivement Eumélanine et Phéomélanine en quantité variable. La production de mélanines différentes est liée à des modifications des composés incorporés au mélanocyte. Les informations génétiques « agouti » sont véhiculées par tout le tissu voisin au follicule (23). La figure 8 montre un poil agouti.

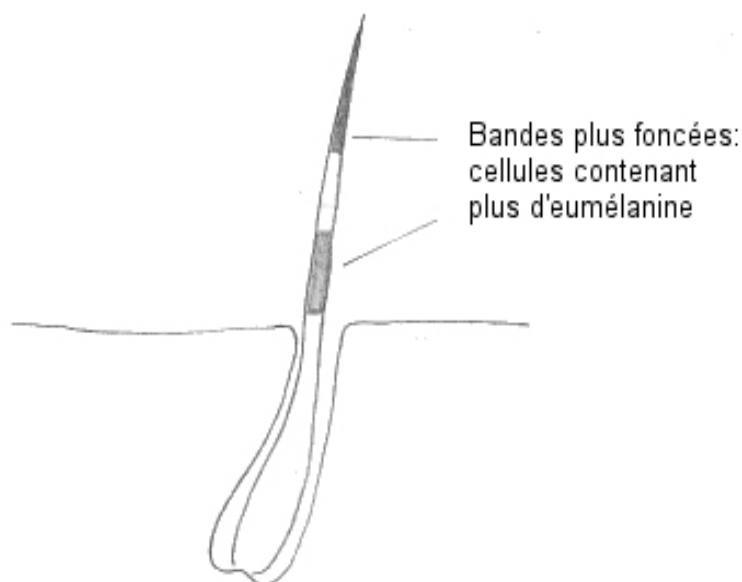


Figure 8 : Poil agouti

Les cellules à mélanine sont inactives en haute altitude et parfois aux températures extrêmement froides. Le poil est alors uniformément blanc (34). Vers la fin de la croissance du poil, les mélanocytes perdent leur activité, leurs dendrites se rétractent, n'assurant plus le passage des mélanosomes. Le pigment n'est plus déposé, la racine du poil est donc blanche (63).

La mélanine est incorporée dans la structure du poil et donc le changement de couleur nécessite une mue (33). L'intérêt du changement de couleur est le camouflage, la régulation de la température. Le poil clair sera plus efficace pour la régulation thermique par temps chaud et ensoleillé (100, 101). Le poil foncé protège la peau des effets néfastes des rayons ultra violets (8).

Le changement de couleur est déterminé par la libération de mélatonine par l'hypophyse. Cette décharge est elle-même influencée par la photopériode et par la température. Les photopériodes courtes plus ou moins associées à des températures faibles inhibent la libération de Mélatonin Stimulating Hormon (MSH) selon Ebling *et al* (34). Au contraire, l'augmentation de la photopériode accroît la production de MSH donc de mélanine, afin de protéger la peau du soleil (8). Le changement de couleur sera plus tardif si le printemps est frais, si l'altitude est élevée (33).

L'apparition de poils blancs chez certains vieux chiens est liée à la diminution du nombre de mélanosomes au sein des mélanocytes, donc à leur moindre efficacité (8). Ce phénomène est dépendant de l'âge.

D Conclusion

Le pelage a des propriétés très intéressantes de camouflage, d'isolation thermique, de sensibilité tactile, d'information sociale chez les carnivores domestiques. Mais ces caractères ne peuvent rester adaptés et efficaces que par un renouvellement régulier. La mue permettra d'adapter la capacité isolante du poil aux conditions extérieures, en modifiant longueur et densité du pelage. Le renouvellement des poils compensera aussi leurs altérations éventuelles.

II Cycle pileaire

Nous avons étudié la structure d'un poil dans sa période mature. Mais chaque phanère arrive dans sa phase « adulte » après une longue croissance. Resté peu de temps à sa taille maximale, il connaîtra alors une régression progressive avant d'être remplacé par un autre. Tous les follicules présents à la surface de la peau d'un carnivore connaissent cette succession d'états différents. C'est ce qu'on appelle le cycle pileaire, illustré sur la figure 9.

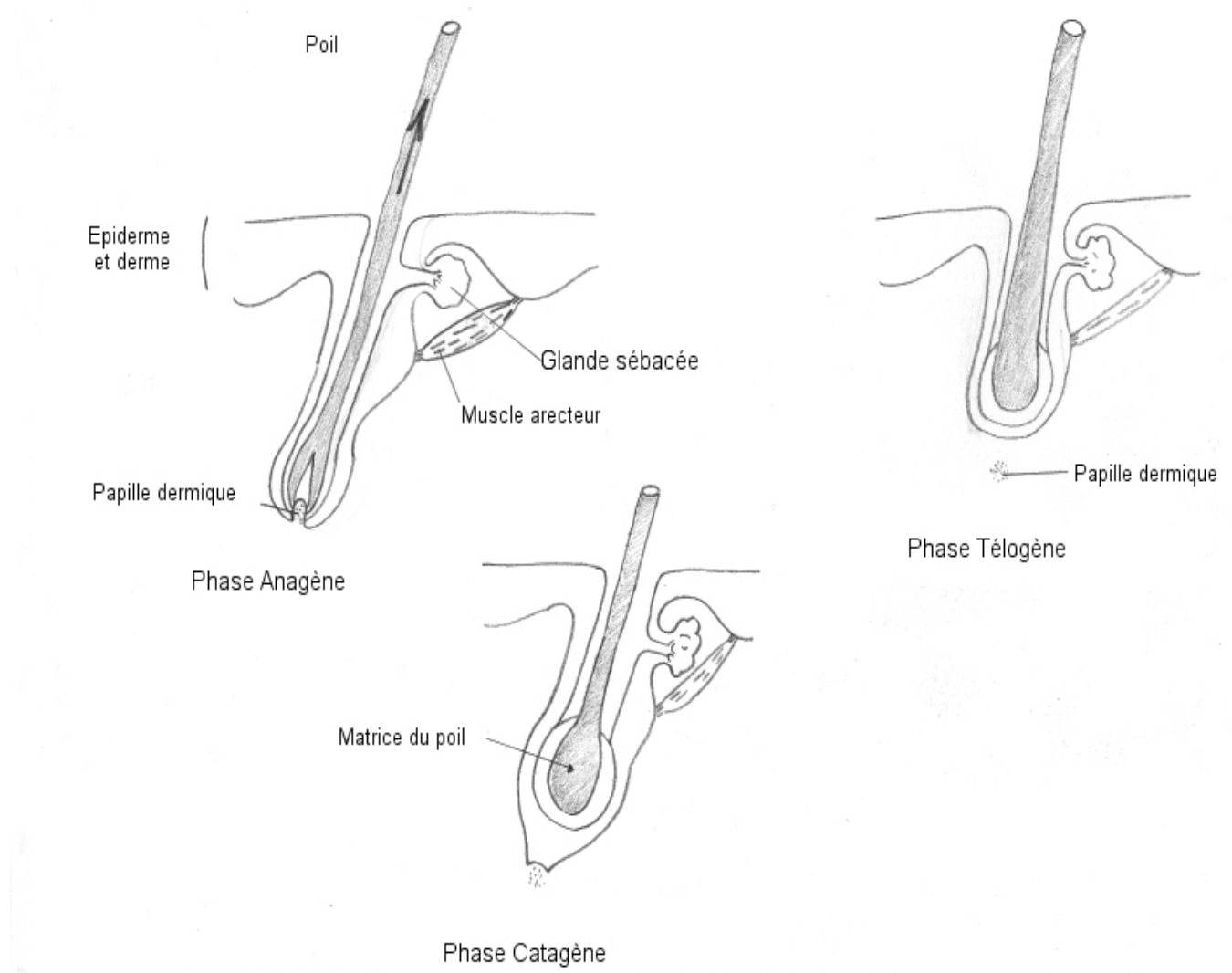


Figure 9 : Représentation simple du cycle pileaire (83)

Baker (7) décrit sur l'ensemble du pelage une période d'inactivité de janvier à mars, suivie d'une période d'activité maximum pendant 2 à 4 mois.

A Différentes phases

Tous les follicules pileux sont présents à la naissance (33, 100). Aucun n'est nouvellement synthétisé mais chacun a ses propres périodes d'activité, d'où une mue en mosaïque (4). De même, au sein d'un complexe pileux, les différents follicules associés ne se trouvent pas forcément dans la même phase (2, 7).

Chaque follicule connaît trois phases d'activité, répétées cycliquement. La phase anagène correspond à la croissance de la tige pileuse. La phase catagène est une période de transition. La phase télogène montre une quiescence du follicule. Une nouvelle phase anagène est alors initiée et entraîne l'apparition d'une nouvelle tige pileuse qui vient déloger le poil précédent. La durée de ces différentes phases est déterminée génétiquement (5) mais peut aussi varier avec l'âge de l'animal, sa race, son sexe, son stade physiologique et son état pathologique (101).

1. Phase anagène

Cette période correspond à une activité intense de mitose et de différenciation cellulaire. Les cellules matricielles sont de grande taille, rectangulaires (2), entourant la papille pour former le bulbe (4, 100). Cette formation pileuse se trouve en profondeur, à la jonction entre le derme et le tissu sous-cutané (7).

A ce stade, les cellules du bulbe se divisent en cellules épidermiques qui se différencient en kératinocytes constitutifs du poil et de ses enveloppes (83). La papille dermique est bien développée, localisée en profondeur du derme (4). Le bulbe est entouré de cellules adipeuses, source de composants utiles à la synthèse de kératine (2).

Pour répondre à la demande en nutriments, la vascularisation du derme devient plus fournie et la peau s'épaissit (63). Les vaisseaux sanguins encadrent le follicule pileux, et pénètrent dans les papilles de grande taille (100). Les follicules de grande taille ont donc des apports sanguins supérieurs, la croissance du poil correspondant sera optimale (100).

D'après Alhaidari (4), la phase anagène se décompose en 6 stades illustrés en figure 10. Les 4 premiers correspondent à la croissance du poil au sein du follicule. Ce proanagène est caractérisé par une activité de différenciation cellulaire intense. Le cinquième stade ou mésoanagène présente une croissance accélérée, le poil va alors sortir de la gaine épithéliale interne. Le dernier ou métanagène traduit l'émergence du poil à la surface de la peau (63). Ces sous-stades seront mieux développés dans le chapitre « 4. Initiation d'un nouveau cycle », toute leur importance sera alors dévoilée.

La vitesse de pousse de la tige pileuse dépend de la race de l'animal (91). Au sein d'une même race, il existe aussi des différences individuelles : la génétique, l'âge, le sexe mais aussi l'état physiologique et pathologique, les traitements pileux et généraux qu'a reçu l'animal (62).

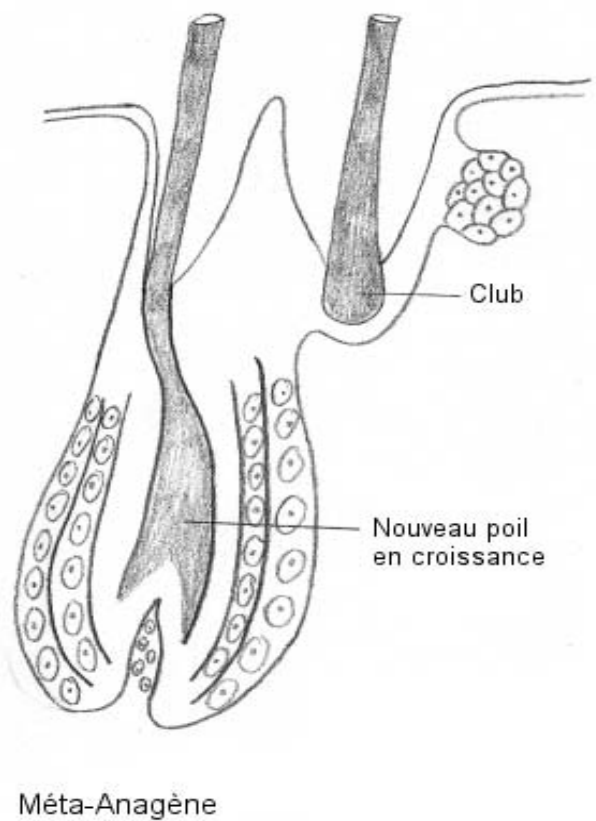
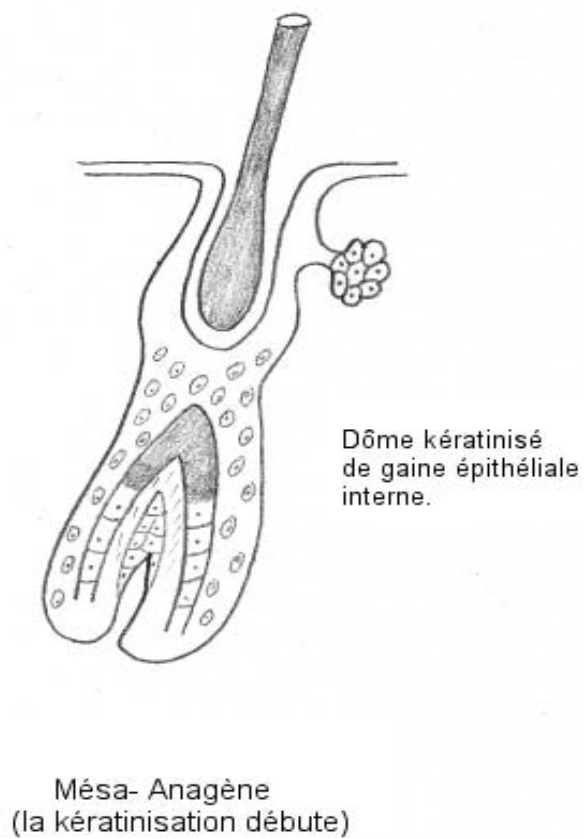
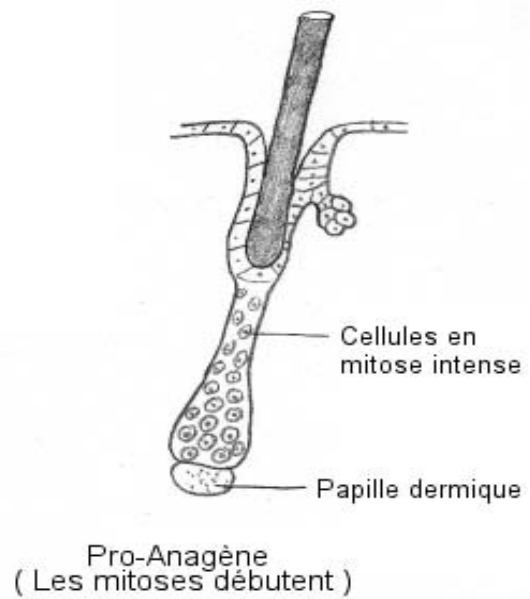
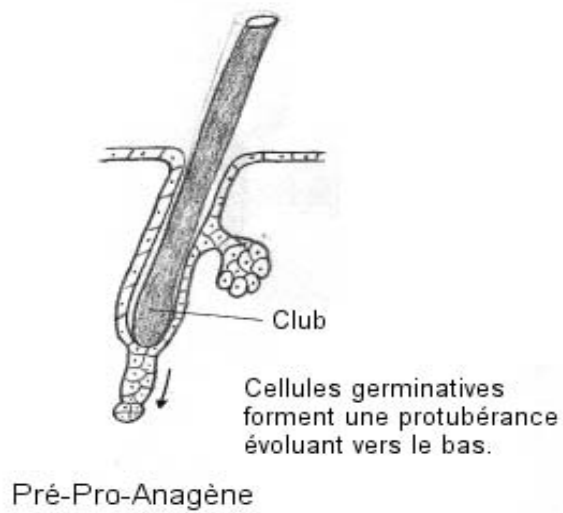


Figure 10 : Les étapes de la phase anagène (33)

La vitesse de croissance d'un poil s'adapte à la longueur terminale, génétiquement déterminée (91, 101). Ainsi les longs poils de couverture grandiront plus vite que les poils secondaires afin d'atteindre, au bout de la même période, des longueurs très différentes (7). La pousse est plus rapide dans la région de l'épaule qu'au niveau des flancs, les poils de la face sont ceux qui grandissent le plus lentement (91).

On observe une croissance moindre, au sein de tous les follicules, la première semaine suivant le début de la mue (91).

D'après Al-Bagdadi *et al* (1), 20% des poils d'un chien sont en phase Anagène, quel que soit la période de l'année. Ainsi, un chien ne sera jamais nu. Al-Bagdadi *et al* (1) observent un maximum de poils en phase Anagène en été et en hiver.

2. Phase catagène

C'est l'arrêt de la croissance de la tige pileaire, l'activité mitotique au sein de la matrice cesse d'après Alhaidari (4). Al-Bagdadi *et al* (2) observent une membrane basale plus fine. Les kératinocytes cessent de se multiplier et ne se différencient plus. Cette période montre des changements morphologiques importants liés à de nombreuses apoptoses. La plupart des cellules de la gaine épithéliale externe sont ainsi résorbées. La gaine épithéliale disparaît complètement (100). La partie inférieure du follicule finit par involuer. Les cellules de la papille restent dans une enveloppe de tissu conjonctif qui se contracte. La papille reste ainsi en contact avec la base du poil qui sera peu à peu repoussée vers le haut (63), jusqu'à la limite inférieure de la glande sébacée (34). Le follicule ne s'étend plus aussi profondément dans le derme (2).

La tige pileaire proximale ne comporte plus qu'un cortex et une gaine interne, elle prend le nom de club (4). Une zone d'attache, à l'aspect d'une brosse, apparaît dans la partie inférieure du club (2). L'ensemble est illustré par la figure 11.

Pendant cette phase, on observe aussi un arrêt de la mélanogenèse. Les mélanocytes rétractent leurs dendrites et ne transmettent plus les mélanosomes aux cellules corticales (4). L'extrémité proximale du poil sera blanche.

Al-Bagdadi *et al* (1) n'observent que 0 à 7% des follicules en phase catagène. Il n'existe pas de pic de poils dans cette phase du cycle, ni de régularité d'apparition. On peut en déduire que c'est une période de transition courte. Le passage de l'ensemble du follicule dans un état quiescent se fait rapidement d'après Butcher (18).

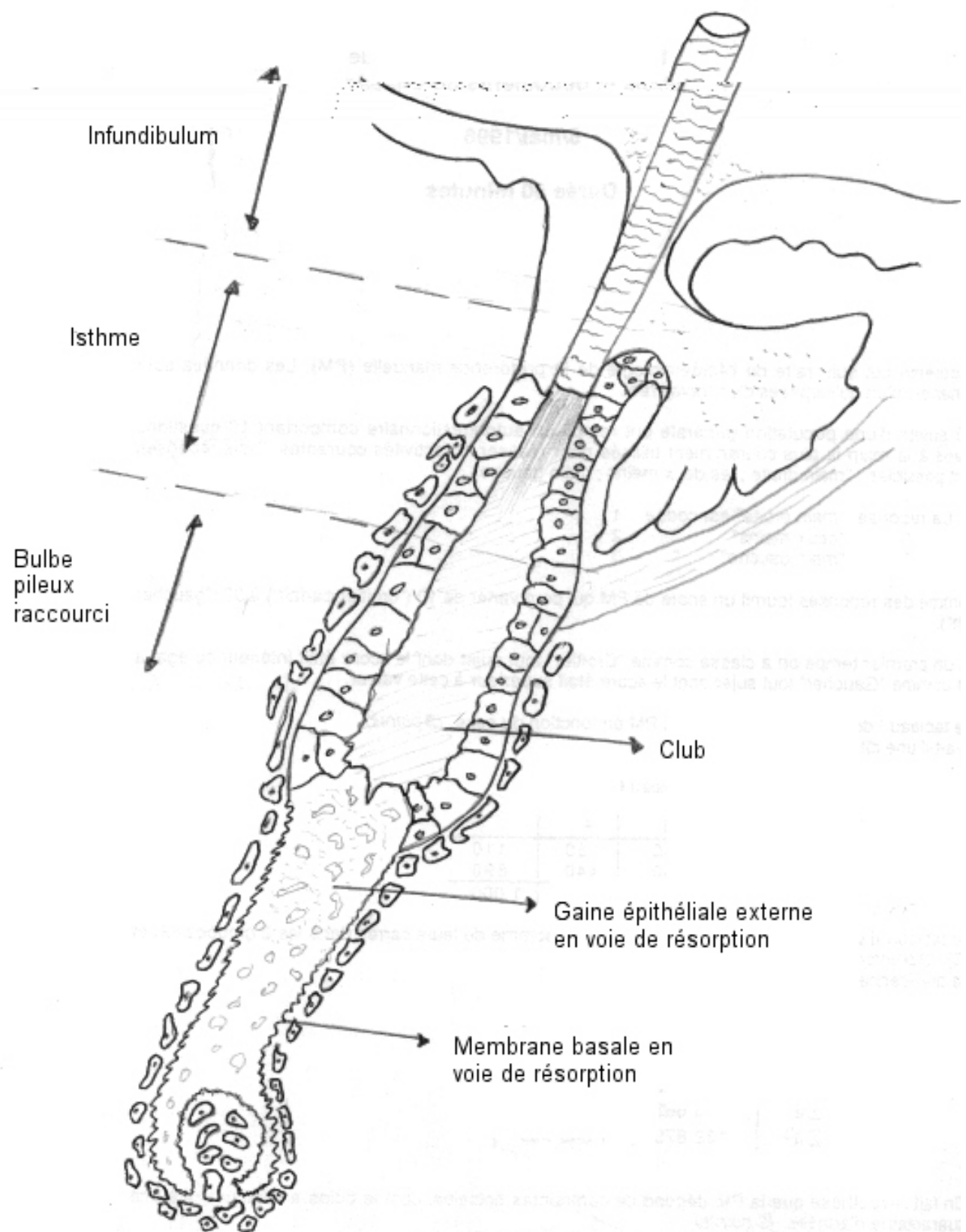


Figure 11 : Follicule catagène (5)

3. Phase télogène

C'est la période de quiescence de la papille folliculaire (94), réduite à un amas de cellules (4). Aucune activité mitotique n'est relevée. La peau voisine, au repos, est plus fine (63). Le follicule a été réduit au tiers de sa longueur initiale (4). Le bulbe a disparu, les cellules des enveloppes sont devenues fusiformes (7). Le poil, mort, se trouve attaché par des radicules kératinisées de la base et des cotés du club (83). Ces fibres kératinisées indépendantes les unes des autres attachent le poil directement à la gaine externe, la gaine interne n'existant plus à ce stade (2).

La croissance du poil suivant peut provoquer la chute du club (Hale, 41), à moins qu'un brossage vigoureux n'ait lieu avant (83). Mais le poil mort peut aussi rester dans le follicule pendant une période considérable (8). La glande sébacée n'est pas affectée par ces changements (7).

Le maximum de poils en phase télogène est observé par Al-Bagdadi *et al* (1) au printemps et à l'automne. Le pic des chutes de poils chez le chien correspond à ces deux saisons, le mois suivant le maximum de phase télogène.

La chute du poil est favorisée par le brossage, l'exercice, l'excitation (104). Néanmoins, une mue ne dure pas moins de 5 semaines chez un chien brossé quotidiennement (41, 100).

Des follicules voisins n'atteignent pas la phase télogène simultanément, ils suivent tous un cycle propre. La chute des poils et leur remplacement se fait en mosaïque (63, 94) et une zone donnée ne perd pas tous ses poils à la fois (91).

La mue permet le renouvellement des poils usés ou abîmés. Le nouveau pelage aura une densité adaptée aux conditions climatiques, une couleur appropriée au temps et aux interactions sociales (41). Le poil d'hiver reste en place 1 à 3 mois ; le poil d'été 2 à 4 mois d'après Al-Bagdadi (1). Par ailleurs, la mue d'automne est moins importante car le sous-poil est conservé (ce n'est pas le cas au printemps).

Il est à noter que la mue du chat n'est pas aussi nette que celle du chien, la chute des poils étant beaucoup plus étalée dans le temps selon les observations de Ryder (98).

4. Initiation d'un nouveau cycle

La papille dermique et le club sont séparés, mais leurs membranes basales se touchent en un point. Ce contact suffit à l'interaction entre cellules de la papille et cellules germinatives, à l'origine de l'initiation d'un nouveau cycle pileux (2, 114).

Le commencement d'un nouveau cycle est marqué par l'augmentation de la taille des cellules de la papille. Leur activité interne est plus intense. Parallèlement, les cellules germinales entrent en mitose. C'est la phase 1 du proanagène (100), dessinée en figure 12.

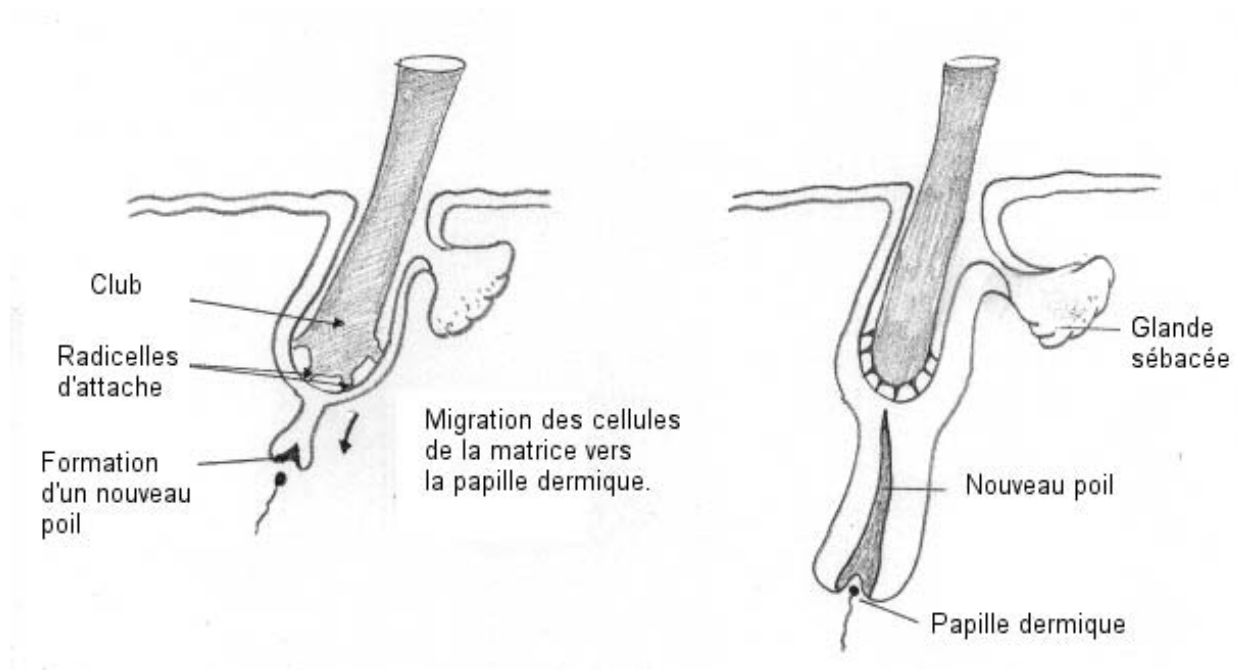


Figure 12 : Initiation d'un nouveau cycle (101)

Dans le stade 2 suivant, ces cellules, nouvellement synthétisées, forment une colonne croissant vers le bas, à travers le derme, jusqu'à la jonction entre le derme et le tissu sous-cutané. La papille se trouve alors juste au-dessous, partiellement encadrée par ces cellules (7, 100).

La phase 3 du proanagène est caractérisée par une prolifération des cellules de la matrice à l'origine d'un cône de gaine épithéliale interne (7, 100).

La différenciation des cellules devient évidente au stade 4 car le dôme est pigmenté grâce aux mélanocytes (7). Ces cellules, entourant la papille, développent alors leurs dendrites et commencent à synthétiser de la mélanine (100). Les mélanocytes des poils noirs synthétisent des pigments tout au long de la phase anagène.

B Déterminisme

Le déterminisme du déclenchement du cycle pilaire n'est pas parfaitement connu. Comment les cellules locales reçoivent-elles le signal du départ d'une nouvelle phase de croissance ? Quelle est la source des cellules constitutives du nouveau poil ? Les acteurs de cette prolifération cellulaire sont déterminés : ce sont les cellules germinatives. Les messages inductifs échangés et leur forme sont encore à découvrir.

1. Cellules germinales

A l'origine de tout arrangement cellulaire organisé, il existe une sub-population de cellules à cycle lent capables de régénération.

D'après Reynolds et Jahoda (94) ce sont des cellules multipotentes. Morphologiquement, ces cellules sont primitives, embryonnaires, peu ou pas différenciées. Elles sont de petite taille et peu nombreuses. Leur localisation est particulière, dans une zone « protégée » (94), un micro-environnement (114).

Au sein du follicule pileux, deux types de cellules répondent à ces critères. Ce sont les cellules germinales, situées dans la partie haute du bulbe pileux, et les cellules de la matrice entourant la papille dermique.

Les cellules germinatives ne peuvent pas se trouver dans la partie la plus basse du follicule, car cette région est détruite au cours du cycle pileux. Elles ont été mises en évidence dans la partie haute du bulbe pileux par Wilson *et al* (114). Cette localisation fixe, ou niche des cellules germinales, conforte Lavker *et al* (63) dans leur idée de sub-population indispensable.

Au contraire, les cellules matricielles se trouvent dans cette zone basse, elles sont donc susceptibles de disparaître au cours du cycle. En effet, Reynolds et Jahoda (94) notent un nombre de cellules de la matrice moindre en fin de phase anagène. Détruites en partie, elles sont nécessairement renouvelées à chaque nouveau proanagène.

2. Interactions entre cellules de nature différente

La grande interrogation que soulèvent Reynolds et Jahoda (94, 95) concerne l'intervention de ces deux types de cellules lors de l'initiation du cycle. Les cellules germinatives sont-elles seules actives? Y a-t-il un relais par les cellules matricielles? Les cellules matricielles sont-elles totalement ou partiellement générées par les cellules germinatives?

D'après Wilson *et al* (114), les cellules à potentiel régénératif du bulbe donnent naissance à la population de cellules transitoirement multipotentes formant la matrice du nouveau poil. Ceci se réalise au cours du proanagène, la matrice permettant ensuite la synthèse de tout le nouveau poil. L'amas de cellules germinales repasse alors dans un stade de dormance.

Par ailleurs, il existe des interactions bien connues entre l'épiderme et le derme. Alhaidari et Von Tscharner (1) ont montré que la naissance d'un follicule faisait suite à un dialogue. Le premier message, non spécifique, est formulé par le derme et ordonne à l'épiderme de produire une annexe. Le second, spécifique, part de l'épiderme pour commander au derme une papille. Enfin, le derme envoie une information quant à la nature du phanère désiré : une vibrisse ou un poil, droit ou frisé.

Les cellules de la papille dermique possèdent les informations nécessaires à deux événements. Elles induisent la formation d'un follicule, par exemple après destruction du précédent par épilation. Il existe une relation directe entre le volume de la papille et la taille du follicule (95). La papille est aussi à l'origine du choix de la nature du poil synthétisé : dur, ondulé, long...

D'après Reynolds et Jahoda (95), les cellules épidermiques régulent la taille de la papille au cours de la croissance pileuse, donc son activité. Par ailleurs, elles peuvent avoir des effets inducteurs sur les cellules dermiques, à l'origine de leur différenciation. Les cellules épithéliales de la gaine externe du poil peuvent devenir un épithélium germinatif lors d'un processus régénératif, toujours sous l'influence des cellules de la papille.

Reynolds et Jahoda (95) ont mis en évidence des transformations de cellules de la gaine en cellules de la papille, lors de renouvellement nécessaire. Les cellules de la gaine, ayant changé de place, subissent des interactions particulières avec les cellules voisines, notamment une stimulation par l'épithélium inférieur du follicule. Ces mêmes auteurs ont noté que les cellules de la gaine épithéliale externe présentaient un mouvement vers le bas, dans la direction des cellules germinales. Cette migration est-elle permanente ou n'existe-t-elle que pendant la formation du club ?

3. Médiateurs en cause

Les échanges entre cellules peuvent être de trois types : par contact direct, par migration de cellules ou de médiateurs. Les deux médiateurs diffusibles ayant un rôle déterminé, selon Moore *et al* (84) sont Epithélium Growth Factor (EGF) et Fibroblast Growth Factor (FGF). EGF est un facteur de différenciation cellulaire et se transmet par contact. FGF permet la prolifération du bulbe pileux et la croissance du poil. Au cours de la croissance du poil, sa composition et son diamètre semblent être liés aux variations des échanges intercellulaires de médiateurs. D'autres morphogènes ont été cités : Transforming Growth Factor (TGF), Bone Marrow Proteins (BMP).

4. Conclusion

Les connaissances actuelles ne permettent pas de détailler le déclenchement cellulaire et moléculaire de la succession des phases. Nous pouvons néanmoins affirmer que le centre du rythme du follicule se trouve en son bulbe, au sein des cellules germinatives. C'est leur multiplication active qui forme ce manchon de cellules vertical, partant du club pour re-coloniser la papille dermique, au proanagène. L'origine bulbaire des cellules matricielles est fortement suspectée. Il faut admettre que la complexité et la multiplicité des interactions entre cellules et avec le tissu intercellulaire rendent ce système extrêmement difficile à étudier. Les études *in vitro* ne peuvent pas tenir compte de tous ces éléments.

C Facteurs de variation

L'ensemble du cycle pileux est soumis à de nombreux facteurs de variation. La longueur relative de la phase télogène peut être altérée. La durée de la phase anagène n'est jamais touchée d'après Ebling et Hale (33), son initiation par contre peut être retardée. Les vitesses de croissance et de mue peuvent être modifiées.

Ebling et Hale (33) soutiennent que même le type de poil synthétisé peut être changé. L'épithélium folliculaire peut voir sa croissance et sa différenciation stimulées (101) ou au contraire inhibées (34).

Considérant la quantité importante d'énergie nécessaire pour la croissance du poil au cours de la phase Anagène, l'arrêt du cycle en une longue phase Télogène est économiquement compréhensible (114).

1. Variations individuelles

L'animal, génétiquement déterminé, possède un rythme pileire propre (101). Au-delà de l'individu se trouve le follicule lui-même : chez nos carnivores domestiques, chaque bulbe pileux est indépendant (1, 33). Cela donne une nouvelle dimension à la variabilité. L'espèce est aussi un élément très important. Le chat ne présente pas de mue marquée mais un remplacement progressif du pelage, contrairement au chien (98). Des anomalies congénitales sont parfois rencontrées, comme l'hypotrichose héréditaire du siamois cité par Sousa (104).

Il existe des similitudes rapportées par Ryder (98) à la race, au sexe. Le diamètre du poil est supérieur chez l'individu non castré, d'après les observations du même auteur (98). Mais Baker (7) et Butcher (18) affirment que la castration n'affecte pas le cycle. Le retour de l'activité sexuelle de nos carnivores correspond systématiquement à la mue de printemps d'après Ebling et Hale (33). La mue correspond aussi très exactement au proœstrus de la femelle selon Al-Bagdadi (1). Ce mécanisme est explicable simplement par la concentration en hormones circulantes (voir le paragraphe « Variations hormonales »). Ebling et Hale (33) remarquent aussi que gestation et lactation retardent la mue. Les oestrogènes alors présents en quantité importante retardent la phase anagène (34). La chute des poils n'a lieu que deux à trois mois après parturition, lorsque le taux d'hormones circulant chute notablement.

Le poil étant constitué de 65 à 90% de protéines, l'alimentation a un effet important sur sa qualité et sur sa quantité (100). Des carences nutritionnelles globales modifient le diamètre du poil mais aussi sa longueur (4). Il est logique de penser que le défaut de nutriments fournis à la papille va provoquer une économie de synthèse du poil. De même, la fourniture en nutriments de mauvaise qualité ou en quantité déséquilibrée, entraîne la formation d'un pelage plus terne, plus fin et moins souple. La papille adapte la composition du poil et sa vitesse de croissance aux nutriments disponibles. Si l'aliment est pauvre, le poil peut devenir fin, sec, cassant, terne et plus ou moins dépigmenté (101). Ceci est essentiellement lié à un défaut de formation de l'épicuticule. Les carences alimentaires n'ont, d'après Lamand *et al* (62), qu'une répercussion tardive sur la composition du poil.

C'est surtout dans la pathologie que l'on va noter de grosses modifications du cycle pileire. Une maladie grave peut provoquer une mue où le sous-poil tombe abondamment (104). On parle d'effluvium télogène car une grande partie des follicules passe simultanément en phase quiescente. Alhaidari (4) observe ce phénomène 2 à 3 mois après un événement stressant.

Une décharge de glucocorticoïdes a alors lieu, ce qui provoque la contraction de la base du poil et le passage en phase télogène (56). La source de stress peut être émotionnelle (naissance), physique (avec hyperthermie, hémorragie, amaigrissement) ou chimique (anesthésie, traitement médical). La repousse du poil est retardée 4 à 6 mois. Une fois la croissance ré-amorcée, un pelage normal ne sera retrouvé qu'après 8 à 12 semaines d'après Baker et Thomsett (8).

2. Variations saisonnières

La modification de la durée du jour semble être le facteur principal déclenchant la mue. La mue de printemps correspond en effet au solstice d'hiver alors que la mue d'automne débute juste après le solstice d'été. Ryder (98) note que les jeunes animaux sont beaucoup moins sensibles au changement de saison.

La diminution de la durée du jour provoque inactivité sexuelle et mue étendue selon Ebling *et al* (34). Le pelage d'été est totalement éliminé. Les follicules redeviennent actifs et sont à l'origine d'un nouveau pelage dense pour l'hiver (33).

L'augmentation de la durée du jour permet la reprise de l'activité sexuelle (34). La mue touche presque uniquement le sous-poil et laisse un pelage moins dense pour l'été. La croissance du poil est arrêtée, le poil d'été est moins long que celui d'hiver (33). Les follicules, inactivés en mars, ne reprennent leur activité qu'en septembre d'après Ryder (98).

Mais tous les poils du chien ne sont pas soumis aux variations saisonnières. 20% des follicules sont en phase anagène, quelle que soit la période. Ainsi le chien n'est jamais nu.

Le mécanisme de la mue est en trois étapes. Sous l'influence de la photopériode, les premiers poils tombent. Les changements hormonaux accélèrent alors le cycle pileux. Entrent en quiescence de nombreux follicules, simultanément (91). La mue est ainsi auto-accélérée jusqu'au pic de chutes. Al-Bagdadi *et al* (1) observent enfin une diminution logique du nombre de poils perdus, jusqu'à arrêt complet.

Les changements de durée d'éclairement interviennent par l'intermédiaire de la rétine sur l'hypothalamus puis l'hypophyse. Les glandes endocrines sont alors stimulées et des hormones libérées. Originaires de la thyroïde, des gonades ou des surrénales, ces médiateurs vont alors initier la mue et modifier la croissance du poil (Ebling et Hale, 33). Les hormones ont un rôle moléculaire primordial dans le cycle pileux, c'est ce qu'on étudiera dans le paragraphe « Variations hormonales ».

D'après Ebling et Hale (33), la température a elle-aussi un rôle. Mais elle agit en plus de la photopériode, rarement seule. La température évoluant parallèlement à la photopériode, il est difficile d'évaluer son action indépendamment. La mue de printemps correspond à l'augmentation de la durée du jour mais aussi à des températures de plus en plus chaudes, et inversement pour l'automne (1). La température influence le déclenchement de la mue, mais de façon moins rapide et moins directe que la photopériode.

La diminution de l'éclairement provoque une mue plus rapidement si les températures associées sont faibles. Ainsi, il semble que la durée du jour initie la mue et que la température contrôle sa progression (34, 100), module son intensité (33, 41).

La température est le facteur le plus probable à l'origine de la différence de vitesse de croissance entre l'été et l'hiver. Les résultats sont controversés sur ce point. Parameswaran Gunaratnam et Wilkinson (91) trouvent une croissance plus rapide en été. Au contraire, Al-Bagdadi (1) met en évidence une pousse légèrement plus importante en hiver. Parameswaran Gunaratnam et Wilkinson (91) concluent néanmoins à une relation entre la température extérieure et l'activité des glandes endocrines, influençant la vitesse de pousse.

La mue est un phénomène d'adaptation aux modifications de température et de conditions extérieures, induite par ces éléments (100).

3. Variations hormonales

Nous avons vu dans les deux paragraphes précédents que le support moléculaire de la variation est constitué par les hormones de l'organisme. Les modifications physiologiques de la gestation sont liées aux oestrogènes. Le stress provoque un effluvium télogène par l'intermédiaire des glucocorticoïdes. L'influence de la photopériode passe par l'hypophyse, chef d'orchestre endocrinien. Le déroulement normal de la mue dépend du bon fonctionnement de l'hypophyse et des glandes thyroïdes, surrénales et gonadiques (33).

a) Hormones hypophysaires

En plus de sécréter des facteurs stimulant les glandes endocrines citées ci-dessus, l'hypophyse libère des hormones qui influencent directement le cycle pileux. C'est le cas de la Prolactine qui limite la vitesse de croissance du poil mais favorise l'augmentation de son diamètre. Elle est libérée en été surtout (5). La Mélatonine, libérée surtout lors de photopériodes courtes, empêche la croissance saisonnière normale du poil et le bon développement des gonades. C'est peut-être le facteur qui couple le fonctionnement endocrinien à la photopériode (34).

L'hormone de croissance GH permet le passage du poil juvénile au poil adulte et le maintien de ce pelage. Lors de carence, l'épilation est facile, l'alopécie fréquente (83). Cette hormone a une activité moindre après maturité (34). Elle favorise la reprise d'activité du follicule pileux (5), comme les hormones thyroïdiennes. L'hypophyse a ainsi une activité saisonnière, cyclique (14).

b) Hormones thyroïdiennes

T3 et T4 accélèrent le remplacement des poils épilés et le cycle de façon générale (33), elles sont nécessaires au déclenchement de la phase anagène (83).

Ces hormones augmentent la longueur finale du poil et favorisent le maintien du poil en place (34). Elles ont une activité stimulante sur le bulbe pileux. Leur carence est à l'origine d'une alopecie par défaut de repousse du poil (83).

c) Hormones stéroïdes

Leur origine gonadique ou surrénalienne n'a pas d'influence sur leur activité selon Ebling et Hale (33).

Les corticoïdes inhibent la croissance du poil, en jouant sur le développement et la différenciation des cellules du follicule d'après Ebling *et al* (34). Le mécanisme d'action est lié à la minéralisation de la membrane basale accolée à la gaine épithéliale externe (83). Après épilation, le nouveau poil met beaucoup plus de temps à pousser en présence de ces hormones (34). L'initiation de la phase Anagène est inhibée (83). Les glucocorticoïdes provoquent aussi une diminution du diamètre du poil selon Ebling et Hale (33), parfois une modification de sa couleur selon Mooney (83).

Toutes les hormones sexuelles limitent la taille finale du poil (œstrogènes, testostérone, androgènes), ceci par l'intermédiaire d'un ralentissement de la croissance. Les œstrogènes retardent le passage dans les différentes phases : la mue est tardive, l'apparition d'un nouveau poil aussi (33). Les cellules cible des androgènes sont les cellules des glandes sébacées (sécrétions liées au sexe) et de la papille dermique (dont la taille est ainsi régulée). Nous pouvons supposer que ces hormones sexuelles ont toute une action directe sur la papille, majoritairement voire uniquement inhibitrice. En cas d'excès, l'épilation est facile, on observe une alopecie débutant aux zones de frottement (83).

4. Conclusion

Les hormones de ces deux groupes ont des influences opposées. L'influence des hormones thyroïdiennes et de GH est positive. L'action des stéroïdes est au contraire négative sur le follicule. Nous comprenons qu'un équilibre stéroïdes-T3 est nécessaire pour que leurs actions se compensent. Alors le cycle, finement régulé, pourra fonctionner normalement.

Par ailleurs la présence adaptée de ces deux catégories d'hormones est nécessaire, selon Baker et Thomsett (8), à la brillance et à la souplesse du pelage. Le rapport entre ces médiateurs varie au cours du cycle, de façon à être adapté aux besoins du moment. Par exemple, la période de mue de la fin du mois de juin correspond à des fluctuations marquées.

Ainsi, les hormones thyroïdiennes connaissent un minimum en juin alors que les stéroïdes sont à leur maximum. Et vice-versa au mois de juillet. C'est l'inversion du ratio qui est à l'origine de la chute des poils selon Ebling *et al* (34). Toutes les influences hormonales sur le poil sont schématisées sur la figure 13.

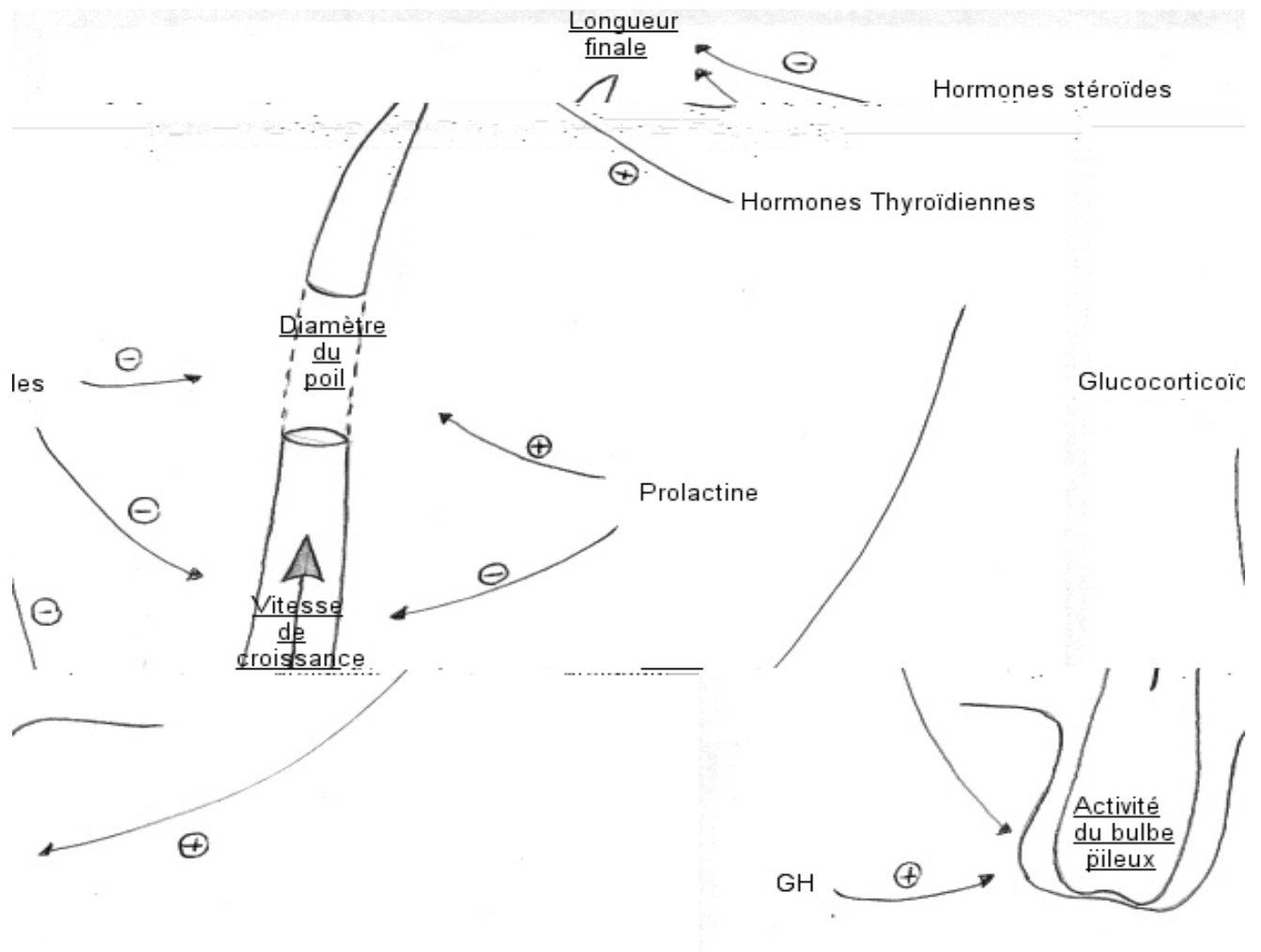


Figure 13 : Intervention des Hormones dans le déroulement du cycle pileux

D Conclusion

Le cycle pileux permet un renouvellement le plus souvent bisannuel de tous

Mais de très nombreux autres facteurs liés à l'individu interfèrent. Les taux d'hormones circulantes sont modifiés en cours de gestation et de lactation par exemple ou à la suite d'un gros stress. Le déroulement du cycle sera influencé par la combinaison des informations hormonales à un instant donné.

Le résultat pouvant être extrêmement complexe, certains états allongés (télogène), d'autres retardés (anagène), il est compréhensible que le déroulement exact des événements soit difficile à cerner.

III Analyse pilaire

A Eléments mesurés

L'analyse des poils de carnivores a pour but, dans notre étude, de mesurer leur teneur en oligo-éléments. C'est un des rares tissus, prélevé sur animal vivant, qui permette une analyse chimique (119). Nous verrons pourquoi les phanères représentent un support intéressant et les principales sources d'erreur quant aux résultats.

Un poil est constitué chimiquement de 4 à 13 % d'eau, de 2 à 3% de lipides, de 0,23 à 0,8% de cendres et enfin de 85 à 93% de protéines (62). Ces protéines de structure, divisées en deux catégories, fibreuses et non fibreuses, ont toute une teneur élevée en soufre. Les protéines non fibreuses ont 30% de résidus cystine. Les kératines, fibreuses, doivent leur stabilité à leur richesse en ponts disulfure. Elles sont ainsi résistantes à la digestion chimique et, de façon générale, à tous les agents chimiques agressifs.

Grâce à la kératine et aux ponts disulfure, le poil fait partie des structures les plus durables du corps entier, restant intact pendant des centaines d'années (100).

La composition principalement protéique du poil est à l'origine du fait que le quart des apports protéiques journaliers est utilisé par le derme (86). Par ailleurs, les besoins de la peau en oligo-éléments sont importants pour promouvoir l'activité de nombreuses enzymes du métabolisme, en tant que cofacteurs (86). L'état du pelage reflète l'équilibre nutritionnel d'un animal.

Quant aux éléments trace, ils sont en concentration importante dans le poil par rapport à tous les autres tissus de l'organisme (38, 59). Mais leur teneur varie énormément selon la localisation du poil sur le corps, selon la distance à la racine, selon l'importance des sécrétions des glandes annexes (62)...

Ces éléments ont une origine interne ou externe (100, 103). A partir de la lymphe, du plasma ou de l'espace intercellulaire, les oligo-éléments sont incorporés dans le poil au cours de sa croissance, en même temps que les autres constituants (62). D'autre part, la tige pilaire kératinisée, ayant perdu son activité métabolique, peut fixer des éléments trace externes. Les principales sources étant l'environnement, les sécrétions cutanées (sueur, sébum) mais aussi des cellules desquamées (62). Ces oligo-éléments extérieurs de contamination sont à l'origine d'un biais dans les résultats.

1. Oligo-éléments dans la structure des poils

Les minéraux mesurés dans les poils ont une origine endogène et sont fixés aux phanères de façon physiologique (62), par des liens intracellulaires permanents. Manson et Zlotkin (76) notent que ce n'est pas le cas de ces mêmes éléments mesurés dans le sang, ni de ceux mesurés dans les urines, excrétés par l'organisme.

D'autres facteurs sont en faveur de ce support d'analyse. Sur le plan pratique, le prélèvement est simple, rapide et atraumatique (59, 119). Notamment, ce sont les chats pour lesquels une manipulation minimale est intéressante (111). Les échantillons sont faciles à transporter et à stocker, le poil étant métaboliquement inerte (35).

La composition du poil en oligo-éléments est homogène, stable d'un jour à l'autre (38). Le flux de sang fournissant les éléments, permanent, homogénéise le taux de minéraux incorporés dans les (89). Il ne changera que très lentement lors de modification des apports (111). L'analyse des poils n'est pas représentative de l'état immédiat de l'organisme (102), même si les éléments circulants y sont parfois retrouvés rapidement (25). Deux heures après injection, des oligo-éléments sont dans le poil (37). D'après Van Den Broek *et al* (111), les concentrations dans les poils résultent d'un effet cumulatif, alors que le sang est un reflet plus ponctuel du métabolisme actuel.

Le sang, en effet, reflète la quantité d'éléments disponibles immédiatement. Selon Laker (59), leur concentration à long terme redeviendra normale, même après une intoxication grave. Au contraire, les poils ont tendance à stocker ces excès. Par ailleurs, le sang est un milieu très complexe, hétérogène. Les différentes parties, sérique, plasmatique ou cellulaires, ne présentent pas la même composition en éléments trace. Et ces minéraux sont en perpétuel échange entre ces compartiments. Ceci ne fait que compliquer la méthode de prélèvement et l'interprétation des résultats obtenus.

La teneur en oligo-éléments dans le poil varie sur sa longueur d'après Laker (59). Le taux d'éléments incorporés à partir du sang dépend de sa concentration immédiate en ces minéraux. Les teneurs sériques sont très variables, pas forcément identiques aux périodes respectives où la base et où l'extrémité du poil sont synthétisées. La croissance de tout le phanère se fait sur plusieurs mois. Le poil est donc le reflet du contenu de l'organisme en éléments trace sur une longue période. Ce caractère « mémoire » est mis à profit pour des études toxicologiques et nutritionnelles, même *a posteriori* (5).

Il a été démontré des relations entre taux d'oligo-éléments dans les poils et prise alimentaire. Le taux dans les autres organes internes évoluant plus ou moins en parallèle (89).

Les concentrations minérales importantes dans les poils permettent une analyse multi-élémentaire, la plus recherchée aujourd'hui (119).

2. Sources de contamination

Deantonio *et al* (27) rappellent que l'analyse pileaire a pour but d'évaluer la quantité d'oligo-éléments présents dans le poil, et non celui fixé à sa surface. Le poil, dès son émergence à la surface de la peau, est soumis aux pollutions de l'environnement (119). C'est pourquoi la plupart des minéraux voient leur teneur augmenter à mesure que l'on s'éloigne de la racine. C'est le cas du Plomb, du Nickel, du Manganèse, du Calcium, du Cuivre et du Zinc dans les travaux de Manson et Zlotkin (76). Les kératines possèdent beaucoup de ponts disulfure, site préférentiel de fixation des oligo-éléments selon Combs *et al* (25).

Le sébum sécrété par les glandes sébacées est une source importante de minéraux d'après Combs *et al* (25). Les sécrétions grasses des glandes apocrines, sur la tige pileaire, sont un moyen physique d'accrochage des minéraux exogènes au poil.

Deantonio *et al* (27) rappellent que chaque site anatomique possède son type de contamination. Les zones fréquemment nettoyées à l'aide de shampooings ou de lotions verront leur composition en minéraux ainsi modifiée.

3. Facteurs de variation

Les teneurs en éléments trace incorporés dans les poils varient selon de très nombreux facteurs détaillés précédemment. Le premier est l'animal lui-même : sa race, son sexe, son âge, son statut physiologique (allaitement), la couleur de ses poils, leur longueur (113). La maladie et le traitement médical peuvent aussi altérer les taux. De même la saison et la ration peuvent intervenir selon Lamand *et al* (62). C'est pourquoi l'interprétation des résultats, même sur un animal connu, est délicate. La contamination par le milieu extérieur reste la source la plus importante de fluctuation des résultats (62).

4. Conclusion

Le poil est constitué d'oligo-éléments d'origine endogène. Les poils sont le reflet des flux d'oligo-éléments dans l'organisme tout entier (figure 14).

Mais l'environnement a une influence relative importante, les concentrations initiales étant faibles. Par ailleurs, des facteurs de variabilité nombreux ont été mis en évidence, liés à la variabilité de la vitesse de croissance d'après Scott (100). A ces variations d'origine biologique, il convient d'ajouter l'influence de la méthode analytique car il n'existe pas de méthode d'analyse standardisée et utilisée par tous. Autant d'éléments faisant que l'analyse pileaire est très délicate d'interprétation.

D'après Combs *et al* (25), tous ces facteurs de variation font que l'analyse pileaire ne donne pas d'indications précises quant au statut minéral de l'animal. Malgré leur précision imparfaite, les résultats d'une telle analyse aident à confirmer, selon Wolter (115), une carence importante en certains minéraux (le zinc notamment).

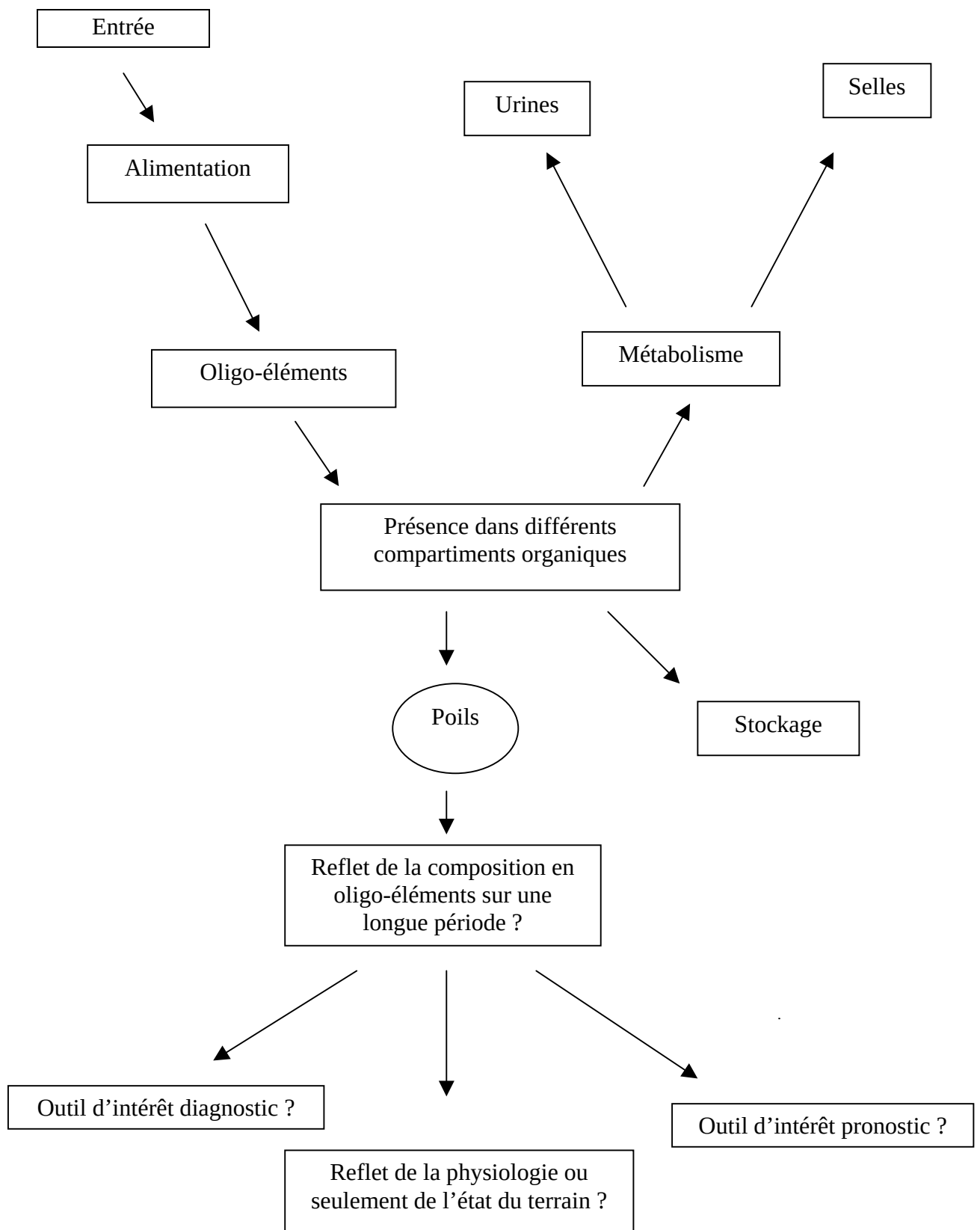


Figure 14 : Les poils reflètent les flux en oligo-éléments de l'organisme entier

B Préparation de l'échantillon de poils

Avant toute analyse, quelle que soit la méthode utilisée, un nettoyage soigneux de l'échantillon doit être effectué. Le but est d'éliminer totalement les éléments issus de l'environnement en respectant parfaitement le phanère lui-même. Par ailleurs, certaines méthodes d'analyse nécessitent la réduction de l'échantillon sous forme de cendres. Deux procédés sont proposés : sous chaleur sèche ou humide.

1. Nettoyage de l'échantillon

La contamination des phanères par le milieu extérieur est importante. Afin d'obtenir des résultats précis quant à la composition du poil, un nettoyage efficace est nécessaire. Ce pré-traitement, tout en éliminant au maximum les éléments exogènes, doit respecter l'intégralité du poil. Pour Lamand *et al* (62), il semble impossible que le nettoyage soit parfait sans aucune altération de la structure du poil. Il faut donc se contenter d'une technique de référence, toujours appliquée, afin que le biais, s'il existe, soit toujours approximativement le même (80).

Dans un premier temps, selon Petering (92), un solvant organique est nécessaire pour éliminer tout matériel gras et toute particule collée aux poils. Ensuite, un détergent ionique (ou non ionique) sera appliqué sur l'échantillon (62). Les taux de Fer ensuite mesurés diffèrent selon le type de détergent. Le détergent ionique, en effet, retire plus efficacement les ions métalliques adsorbés sur la gaine du poil (92). Le Sodium Lauryl Sulfate est le plus utilisé selon Shapcott (102). Il solubilise les métaux lourds bivalents et les ions métalliques terreux selon les travaux de Petering (92).

Des lavages successifs à l'acétone seule puis diluée dans de l'eau sont conseillés par l'agence internationale pour l'énergie atomique, retranscrit par Lamand *et al* (62). Les agents chélatants ont une action bien plus forte selon Hambridge (62). Ils éliminent plus que les éléments de surface. Ils diminuent notablement les teneurs en Zinc, Calcium et Magnésium du poil (45). Pour ces mêmes auteurs, ils sont intéressants lors de soins préalables sur le pelage à l'aide de crèmes, de gels...

Un lavage final à l'eau déminéralisée est nécessaire pour l'élimination de tous les détergents utilisés et des sels solubilisés, selon les résultats de Petering (92). Cette étape de lavage est minutieuse, longue et demande parfois un appareillage adapté et une main d'œuvre formée.

2. Mise en cendres de l'échantillon

Avant analyse, selon l'appareillage utilisé, l'échantillon doit être totalement minéralisé, ceci par combustion. D'après Schroeder et Nason (99), le processus majoritairement utilisé est le four à 400-450°C, en chaleur sèche. Les résultats obtenus sont cohérents pour la plupart des oligo-éléments.

En ce qui concerne les éléments volatils comme le Sélénium ou le Mercure, d'autres procédés sont préférables. Le même four peut être utilisé, mais à sa température minimale. Le traitement dure alors 24, 48 heures ou plus... La chaleur humide est aussi utilisable. L'échantillon est alors dans un bain mixte d'acides nitrique, sulfurique et perchlorique plus ou moins complété par du molybdate de sodium. L'échantillon, de 2 grammes au maximum, est alors mis en cendres en 30 minutes seulement.

3. Conclusion

Chaque méthode a ses intérêts et ses limites d'utilisation. Les différents laboratoires peuvent utiliser les unes ou les autres selon leurs compétences et leurs installations. Mais à partir du moment où des résultats ne sont pas obtenus par les mêmes méthodes, ils ne sont pas comparables... On retrouve tout l'intérêt du choix d'une méthode universelle, commune à tous les laboratoires.

C Différentes méthodes

Chacun des procédés présentés dans ce paragraphe est utilisé pour mesurer les teneurs en différents oligo-éléments dans les poils d'animaux et de l'homme. Les principaux problèmes sont liés d'après Iyengar *et al* (49) aux très faibles concentrations de certains éléments et à la volatilité d'autres. Après une très brève explication de la méthode, ses avantages et ses limites seront abordés.

1. Méthodes sans destruction préalable de l'échantillon

a) La spectrométrie aux rayons X

L'émission de rayons X par les particules constitutives de l'échantillon est mesurée par un spectromètre. Cette technique a une bonne sensibilité pour la détermination de nombreux éléments (49), surtout pour le Sélénium (93). Elle est rapide mais la fidélité et la justesse des résultats obtenus est médiocre selon Pinta (93). Ceci s'explique essentiellement par des interférences liées à la matrice du poil.

b) L'activation nucléaire

Une première méthode consiste à activer le noyau de neutrons. L'échantillon est très peu préparé. L'automatisation est poussée, l'instrumentation extrêmement chère. De nombreux éléments peuvent être mesurés sur un seul échantillon, mais l'interprétation demande une grande expérience. C'est la méthode de référence selon Iyengar (49). L'inconvénient principal est l'utilisation de la radioactivité, à l'origine du haut pouvoir de détection.

La seconde est une méthode spectrométrique après activation en masse du noyau de neutrons. Cette technique est principalement utilisée pour mettre en évidence l'impact d'une thérapeutique sur les concentrations pilaires en éléments trace. Les résultats permettent d'apprécier l'efficacité du dosage médical (49).

c) La spectrométrie de fluorescence atomique

Le principe repose sur le fait qu'un atome, excité par absorption d'un rayonnement convenable, se désactive avec émission d'une radiation de longueur d'onde égale ou supérieure. La source d'excitation atomique est ici une flamme d'air et d'acétylène.

La sensibilité est bonne, ce qui permet des mesures sur un petit échantillon. Les concentrations peuvent même être calculées sur une coupe transversale de poil (62). Les résultats sont bons pour tous les oligo-éléments d'intérêt médical selon Schroeder et Nason (99).

2. Méthodes avec destruction préalable de l'échantillon

Ce sont les plus utilisées selon Lamand *et al* (62).

a) La spectroscopie d'émission atomique

Le plus souvent on utilise l'induction couplée au plasma. Le plasma est un gaz neutre totalement ionisé, à l'origine de l'ionisation en chaîne des autres particules. Elle permet de limiter les interférences par rapport aux autres méthodes par émission. Les radiations émises par l'atome excité sont analysées à l'aide d'un spectrographe.

La sensibilité de la méthode est élevée, la précision adéquate, essentiellement pour les éléments majoritaires (49). L'analyse peut néanmoins être multi-élémentaire, qualitative ou semi-quantitative (93). Cette technique est intéressante lorsque les échantillons sont nombreux, ainsi que les éléments à analyser au sein de chaque échantillon (49). Aucune préparation chimique préalable n'est nécessaire. Le coût des instruments et de chaque opération est élevé.

b) La spectrométrie de masse

La source d'ionisation se fait ici aussi par induction couplée au plasma. Les molécules ionisées sont dispersées dans un champ électrique puis magnétique, formant finalement un spectre décrit par Pinta (93). L'analyse est directe, rapide et pratique. Elle concerne plusieurs éléments à la fois. La sensibilité est bonne pour tous les oligo-éléments métalliques sauf le Calcium et le Fer.

Ce problème est compensé par les concentrations importantes de ces deux éléments dans les tissus. Cette technique combine la sensibilité élevée de l'absorption atomique électrothermique et la capacité d'analyse multi-élémentaire de l'émission atomique selon Iyengar (49).

c) La spectrométrie par absorption atomique sous flamme

La sensibilité de l'absorption atomique est bien supérieure à celle de l'émission. La préparation de l'échantillon ne pose aucune difficulté (93). L'automatisation est poussée, ce qui fait peu intervenir l'opérateur. Un système à injection permet de diminuer le volume d'échantillon nécessaire et la consommation des réactifs. L'ajout des solvants et les dilutions sont automatisées, ce qui augmente considérablement la vitesse d'analyse selon d'Iyengar (49). Une pré-concentration par échange d'ions augmente les taux en éléments toxiques et en Aluminium, Chrome, Nickel, Molybdène. Le champ d'application de la méthode est ainsi élargi (49).

d) La spectroscopie par absorption atomique électrothermique

Il existe dans ce processus un contrôle permanent de la température. Cela est favorable à l'analyse d'oligo-éléments volatils tels que le Plomb, le Cadmium, le Sélénium. La destruction préalable de l'échantillon étant nécessaire, la prise d'essai minimale sera de 20 à 200mg. Cette méthode est plus sensible que la précédente, sous flamme (93). Elle est donc plus utilisée. C'est un procédé adapté à la plupart des oligo-éléments, même les plus difficiles à analyser comme le Chrome et le Molybdène selon Iyengar (49). Le tout petit prix de l'instrumentation en fait la technique la plus utilisée aujourd'hui.

3. Autres méthodes

Les techniques physico-chimiques sont moins utilisées car beaucoup plus spécifiques d'un ou de quelques oligo-éléments. La colorimétrie permet de mesurer le Molybdène, la photo-fluorométrie le Sélénium. La méthode standard pour mesurer le plomb dans de petits échantillons, plus sensible que l'absorption atomique, utilise la Dithizone.

La polarographie a une haute sensibilité et utilise un appareil simple et maniable (93). Le principe est que l'intensité du courant électrique qui apparaît entre deux électrodes est proportionnelle à la concentration en ions de la solution de bain.

Les méthodes de pointe sont toujours plus automatisées. Leur but principal est l'augmentation de la sensibilité sur des échantillons de plus en plus petits d'après Schroeder et Nason (99). L'optimisation concerne les éléments les plus intéressants ou les moins concentrés (62).

4. Conclusion sur les différentes méthodes d'analyse

La variabilité de la composition des poils est importante. L'utilisation de méthodes différentes accentue cette variation. Des résultats obtenus de diverses manières ne sont pas comparables. La standardisation des procédés de prélèvement, de lavage et d'analyse est nécessaire à la cohérence d'ensemble selon Zlotkin (119).

Aujourd'hui, l'objectif est l'analyse simultanée de plusieurs éléments sur un même échantillon. Mais aucune technique n'apporte précision et sensibilité bonnes pour tous les oligo-éléments. La technique de référence choisie est l'activation nucléaire des neutrons.

Chaque laboratoire, quelle que soit sa méthode, doit effectuer des contrôles de qualité réguliers en comparant ses résultats à la référence. Il échelonnera ensuite sa machine en conséquence. Ainsi, les résultats obtenus dans les laboratoires resteront dans une marge acceptable de variabilité d'après l'étude de Lamand *et al* (62). La technique utilisée dans ce travail est celle du laboratoire d'analyses médicales SEROM développée dans l'annexe II.

D Conclusion

Le poil est un milieu riche en oligo-éléments, facile à prélever et à transporter. Ses caractères en font un support intéressant pour la recherche du statut d'un animal en différents éléments trace indispensables. C'est pourquoi de nombreuses recherches se sont appliquées à mettre en évidence des liens entre les résultats d'analyse et les réserves organiques effectives (hépatiques par exemple) en certains oligo-éléments.

Mais, les conclusions sont très divergentes quant à l'intérêt de l'analyse pileaire. La cause en est le nombre élevé de sources de variation des résultats. Il faudrait contrôler à la fois la contamination de l'échantillon par le milieu extérieur, l'état physiologique et pathologique de l'animal donneur et la qualité des procédés de récolte et de traitement.

C'est extrêmement contraignant, voire même impossible pour certaines structures d'étude. Toutes ces difficultés sont à l'origine de l'existence de cette diversité de méthodologies. Aucun procédé ne semble parfait. Ou bien, les résultats sont-ils si changeant qu'aucun processus ne peut donner une homogénéité des résultats ?

Deuxième partie : RAPPEL SUR LA PLACE DES MINERAUX EN BIOLOGIE

Afin de mieux appréhender les données analytiques issues des expérimentations, nous allons exposer le rôle des oligo-éléments qui nous intéressent à l'échelle de l'organisme. Nous verrons alors pourquoi il est intéressant de connaître le statut de l'animal en minéraux, donc de les étudier au sein des phanères.

I Aluminium

L'Aluminium est présent en quantité importante dans l'environnement, néanmoins une très faible quantité est absorbée et retenue par les organismes vivants. La majeure partie de l'Aluminium ingéré est directement rejeté par voie fécale. La portion absorbée est éliminée efficacement par les reins (75). L'Aluminium retenu par l'organisme se dépose chez le chien et le chat dans les parathyroïdes (50), le foie, le squelette et le cerveau (87).

Les effets néfastes de l'Aluminium s'expriment le plus souvent dans le cadre d'insuffisances rénales chroniques (50). C'est alors que peuvent se développer des symptômes caractéristiques tels que :

- a** une encéphalopathie ;
- b** une ostéomalacie avec douleurs osseuses et articulaires parfois suivies de fractures spontanées, déformations osseuses ou myopathies invalidantes ;
- c** une anémie microcytaire hypochrome.

L'intoxication est liée à l'inhibition de nombreuses enzymes par l'Aluminium en excès (75). Entre autres :

- l'acétylcholinestérase ;
- l'hexokinase ;
- la calmoduline ;
- et des enzymes de réplication nucléaire.

II Cadmium

A Absorption et répartition

Sur le plan métabolique, on observe des effets potentialisés entre le Sélénium et le Cadmium (99). Par contre, il existe un antagonisme avec le Cuivre (90). Combs

et al (25) décrivent aussi une interaction avec le Fer, principale cause, d'après eux de la toxicité du Cadmium.

L'efficacité de la fixation digestive du Cadmium dépend du rapport Cadmium / Zinc de la ration. L'absorption du Cadmium est moindre lorsque le Zinc est en concentration importante (109). Le Zinc et le Cadmium ont en effet les mêmes ligands, ce qui explique aussi pourquoi le Cadmium se fixe à la place du Zinc dans certains tissus comme les reins (99).

De façon plus générale, Underwood (109) décrit une action antagoniste entre les cations divalents (Zinc, Cuivre, Mercure, Sélénium, Fer) et l'absorption du Cadmium. Cette interaction intervenant aux sites d'adsorption digestive mais aussi dans les tissus (75).

B Syndrome d'intoxication

D'après Schroeder et Nason (99), le Cadmium de l'environnement est responsable des problèmes les plus insidieux et les plus répandus causés par les oligo-éléments. Zantopoulos *et al* (116) décrivent aussi le Cadmium comme l'un des métaux lourds les plus toxiques.

D'après Underwood (109), le Cadmium est absent de l'organisme à la naissance, il se dépose progressivement avec l'âge (116). L'accumulation du Cadmium porte sur le foie puis (75) sur les reins (116), parfois sur les parois vasculaires (99). Le dépôt rénal a lieu dans le cytoplasme des cellules des tubules proximaux et distaux des néphrons, mais aussi dans les cellules de la bordure en brosse (46).

L'accumulation de Cadmium, ainsi que ses interactions minérales (Zinc, Sélénium, Cuivre, Fer) peuvent provoquer :

- 1 une hypertension artérielle (116),
- 2 de la sclérose artérielle (99),
- 3 des cancers de la prostate (116),
- 4 des perturbations de la spermatogenèse (46), accompagnées d'une diminution du développement testiculaire (25),
- 5 des dysplasies (116), avec élargissement des articulations (25),
- 6 de la mortalité embryonnaire (116),
- 7 des mutations (116) avec augmentation du taux de micro-nucléi dans la moelle osseuse (46),
- 8 une anémie par interaction avec le Fer (25) et le Cuivre (109),

9 une diminution de la croissance et une augmentation de la mortalité des jeunes (25),

10 une altération de l'état de la peau, qui peut devenir rugueuse (25), ceci suite à l'antagonisme avec le Zinc (109).

III Calcium

A Absorption et répartition

Le Calcium est un macro-élément, c'est le minéral le plus abondant dans l'organisme animal (68).

Le Calcium et le Phosphore sont fortement liés entre eux sur le plan nutritionnel. Plus que la concentration en Calcium dans l'aliment, c'est le rapport phosphocalcique qui détermine la qualité de la ration, surtout chez les jeunes (16). L'absorption de ces deux éléments a lieu de façon corrélée, dans le duodénum (68).

B Rôles

1 Avec le phosphore, le Calcium est le minéral majeur assurant la rigidité des os et des dents (16). 99% du Calcium se trouve dans les os (21). Dans l'os, le Calcium sert de matériel de structure mais aussi de réservoir ionique (43).

2 Le Calcium joue un rôle dans la coagulation sanguine (16). L'ion Calcium doit être présent pour la transformation de prothrombine en thrombine, molécule qui réagira avec le fibrinogène pour donner le clou de fibrine (68).

3 Sous forme d'ion, il permet la transmission de l'influx nerveux (16) et maintient une certaine excitabilité neuromusculaire (68).

4 Le Calcium circulant intervient dans la contraction musculaire, et par conséquent dans le fonctionnement cardiaque (21).

5 Ce macro-élément contrôle la perméabilité et les échanges membranaires (21).

6 Le Calcium intervient pour la stabilisation (68) ou l'activation de nombreuses enzymes (21). Il a aussi un rôle dans la sécrétion de nombreuses hormones et facteurs hormonaux (68).

C Syndrome de carence

Lors de carence en Calcium, on peut voir apparaître chez le chat, d'après le NRC (88) :

1 un hyperparathyroïdisme secondaire d'origine nutritionnelle, ceci plus fréquemment chez les jeunes chats, avec une hyperplasie de la glande parathyroïdienne ;

2 une ostéoporose à l'origine de troubles locomoteurs, à l'origine de chats qui rampent pour avancer, voire qui refusent de se déplacer.

D Syndrome d'intoxication

Dans les conditions de nutrition normale, le Calcium est absorbé en fonction des besoins, l'excès étant excrété. Mais lors d'apport en quantité toxique, apparaîtront, selon Mac Dowell (68) :

1 des désordres osseux ;

2 une diminution de la prise alimentaire donc de la prise de poids ;

3 une réduction de l'utilisation du Zinc, provoquant une parakératose sévère ;

4 un syndrome hémorragique suite à l'antagonisme Ca - vitamine K ;

5 une moindre efficacité de l'absorption digestive ;

6 le dépôt de sels de Calcium dans les tissus mous.

IV Chrome

A Absorption et répartition

Le Chrome est absorbé par diffusion passive au niveau du jéjunum surtout. Des métaux tels que le Zinc et le Fer peuvent former des complexes avec lui et diminuer son absorption (31).

B Rôles

Le Chrome intervient :

1 dans le métabolisme glucidique par un effet potentialisateur de l'insuline et en tant que cofacteur de certaines enzymes impliquées dans ce métabolisme (31) ;

2 dans le métabolisme lipidique (31), par contrôle de l'homéostasie sérique du cholestérol (109) ;

3 dans le métabolisme protéique, par l'intermédiaire de l'insuline d'une part, mais aussi en favorisant la synthèse de l'ARN, donc l'expression des gènes (31).

C Syndrome de carence

La carence en Chrome provoque diminution de la croissance et de la longévité d'animaux d'expérience selon Underwood (109). Elle peut être à l'origine de la formation de plaques d'athérosclérose (99).

Avec une déficience sévère en Chrome, un syndrome de type diabète peut apparaître (109), avec glycosurie et hyperglycémie (99). Ceci est cohérent avec l'hypothèse d'Underwood (109) selon laquelle la première modification biologique liée à une carence en Chrome est une diminution de la sensibilité périphérique à l'insuline.

D Syndrome d'intoxication

Le Chrome sous sa forme ionique la plus courante (Cr^{3+}) a une toxicité très basse. L'écart entre la quantité normalement ingérée et la quantité toxique est énorme.

V Cobalt

Cet élément est largement réparti dans tout l'organisme, avec des concentrations supérieures dans le foie, les os et les reins (109).

Le Cobalt est un constituant de la vitamine B12. Ses indications cliniques sont connues par l'intermédiaire de cette vitamine. Elle fait partie des nombreuses enzymes qui assurent les fonctions métaboliques de base (71). Les tâches principales de la vitamine B12 concernent le métabolisme des acides nucléiques et des protéines. Elle permet la synthèse des globules rouges et assure l'intégrité du système nerveux. Le Cobalt intervient ainsi dans la réaction immunitaire, dans la protection contre les infections; son utilisation est aussi accrue lors d'accidents cérébraux (99).

Le besoin en Cobalt est certain, mais la quantité nécessaire est la plus faible de tous les oligo-éléments. C'est ce qui explique la rareté des carences en cet élément. Lorsque l'apport alimentaire en vitamine B12 est adapté, le chien n'a pas besoin de supplémentation en Cobalt (16).

Aucune carence en Cobalt n'a jamais été mise en évidence sur des animaux de laboratoire (9, 109). Néanmoins, Mac Dowell (71) décrit des états de carence avec amaigrissement, anorexie et atteinte de la fonction reproductrice.

Le Cobalt possède une toxicité faible (109). Mais un excès conséquent en cet élément dans la ration peut provoquer anorexie, amaigrissement voire émaciation et

anémie. Ce dernier symptôme est certainement lié à l'antagonisme qu'exerce un excès de Cobalt sur l'absorption intestinale du Fer (71).

Baruthio (10) décrit des effets hématologiques (polycythémie), cardiaques, thyroïdiens (effet goitrogène), rénaux et pancréatiques suite à l'ingestion de grandes quantités de Cobalt.

VI Cuivre

A Absorption et répartition

D'après Houot et Tarallo (47), 50% du Cuivre ingéré est absorbé (96), au niveau de l'estomac et du jéjunum essentiellement (109). Le zinc inhiberait le passage du Cuivre à travers la séreuse digestive, vers le sang. Les métallothionéines participent activement à la régulation de l'absorption digestive du Cuivre. Le Cadmium (90) et le Zinc, inducteurs de la synthèse de ces protéines, peuvent perturber le mécanisme.

Le Cuivre est stocké préférentiellement dans le foie, le cœur, le système nerveux central et les reins (21). Ce sont les mêmes organes qui vont le libérer en priorité lors de carences (96). Le Cuivre hépatique est alors le premier mobilisé.

B Rôles

1. Biochimiques

Le Cuivre est un cofacteur essentiel de nombreuses protéines impliquées dans les réactions d'oxydoréduction. Par exemple :

- a l'histaminase, qui est impliquée dans la dégradation du neurotransmetteur du même nom (47) ;
- b la tyrosinase intervenant au niveau de la peau et des yeux pour la synthèse du précurseur de la mélanine (47) ;
- c la superoxyde dismutase, qui protège les cellules contre l'effet toxique des radicaux libres (47) ;
- d la cytochrome C oxydase, qui intervient dans la chaîne respiratoire (47) en produisant de l'ATP (96) ;
- e la céruloplasmine, qui assure, entre autres, le transport du Cuivre (47), 90% du Cuivre plasmatique étant lié à cette protéine (96) ;

f les métalloprotéines, intervenant dans la régulation du métabolisme du Cuivre (47) ;

2. Physiologiques

Ces fonctions où le Cuivre intervient découlent directement de ses implications enzymatiques :

a) le métabolisme du Fer

Le Cuivre permet le passage du Fer au niveau du duodénum. Mais il entre en jeu dans le métabolisme du Fer essentiellement à travers la céruloplasmine. Cette molécule assure :

1 d'une part l'oxydation du Fer sanguin afin qu'il puisse être capté et transporté par la transferrine (47) ;

2 d'autre part, la mobilisation du Fer à partir de la transferrine ou de la ferritine afin de le rendre disponible pour l'hématopoïèse (21).

b) la synthèse de l'élastine et du collagène

La lysyl-oxydase assure polymérisation et synthèse de l'élastine et du collagène, constituants des tissus vasculaires, osseux, et des cartilages (47). Cette enzyme assure aussi le maintien de l'intégrité de ces tissus de connexion (43).

c) la pigmentation

La tyrosinase et la polyphénol-oxydase catalysent les deux oxydations menant à la molécule de base servant à la synthèse de la mélanine (15).

d) la protection contre le stress

Au sein de la dopamine B-hydroxylase, et de l'histaminase, le Cuivre intervient dans le métabolisme des neurotransmetteurs que sont la dopamine et l'histamine (47) .

C Syndrome de carence

D'après Case *et al* (21), la carence n'est pas fréquente. Chez le chaton, elle produit des troubles des tissus de connexion type ligaments et tendons (29).

Chez le chat adulte, Hand *et al* (43) décrivent, lors de carence en Cuivre :

- 1 des performances reproductives amoindries,
- 2 des mortalités embryonnaires précoces,

- 3 des malformations fœtales ,
- 4 du cannibalisme,
- 5 une hypopigmentation de la peau,
- 6 un carpe en position inversée.

Chez l'agneau, Inglis *et al* (48) parlent du syndrome de Swayback à la suite d'une carence en Cuivre. Ils ont observé chez ces animaux, en plus des lésions nerveuses, une plus grande sensibilité aux organismes pathogènes donc à différentes maladies, à l'origine de leur mort précoce.

Une croissance asymétrique du squelette des ovins peut aussi apparaître, à l'origine d'une ataxie (21) voire de fractures spontanées. L'anomalie histologique est une ostéoporose avancée, suite à une diminution de l'activité des ostéoblastes provoquée par la carence en Cuivre (109).

Une carence en Cuivre peut aussi être accompagnée d'infertilité et de désordres cardiaques (109) chez les animaux de rente.

D Syndrome d'intoxication

L'excès de Cuivre chez les carnivores domestiques ayant un métabolisme normal est bien moins fréquent que sa carence, mais il peut interférer avec l'utilisation du Zinc et du Fer (43).

Rarement décrit, il est le plus souvent en relation avec l'eau de boisson. Parmi les animaux familiers, les ovins sont les plus sensibles (32).

L'intoxication touche divers organes : Foie, tube digestif, reins et appareil hématopoïétique. Même si la clinique qui en découle est le plus souvent mixte, nous allons étudier séparément l'impact sur chacun de ces organes afin de mieux comprendre la pathogénie.

1. Accumulation du Cuivre dans le foie

Le syndrome associé est composé, comme dans toute maladie hépatique, de léthargie, d'anorexie couplée d'une grande soif (21). Des vomissements bleu-verts (32) peuvent apparaître avec des douleurs abdominales. Le chien est déshydraté, plus ou moins déprimé.

2. Toxicité gastro-intestinale

L'intoxication par ingestion peut provoquer l'apparition d'ulcères digestifs, avec douleur abdominale, diarrhée, vomissements et déshydratation (Duncan, 32).

3. Toxicité sanguine

L'augmentation brutale de la cuprémie peut provoquer une hémolyse intravasculaire (32), à l'origine d'une pâleur importante des muqueuses et d'hémoglobinurie.

4. Toxicité rénale

La nécrose tubulaire induite par le Cuivre en excès permet le passage de l'hémoglobine dans l'urine.

VII Fer

A Absorption et répartition

L'absorption digestive du Fer dépend, entre autres facteurs, de sa forme chimique et de son origine. Le Fer ferreux est mieux absorbé que le Fer ferrique, le Fer d'origine animale mieux que celui de source végétale (16).

De plus, un état d'anémie sévère provoquera une absorption bien plus efficace du Fer par l'animal (87).

B Rôles

Le Fer est un composant de nombreuses chromo-protéines à groupement hème qui entrent en jeu dans la respiration au niveau cellulaire (16) :

- 1 l'hémoglobine, molécule essentielle au transport de l'oxygène (87) ;
- 2 la myoglobine qui contient 7% du Fer total chez le chien (valeur importante dans cette espèce d'après Underwood (109)) ;
- 3 les cytochromes qui assurent la chaîne d'oxydoréduction cellulaire (58) ;
- 4 les peroxydases et catalases, enzymes où le Fer se trouve aussi lié à une porphyrine (61).

Le Fer fait aussi partie, sous forme non héminique, de divers composés biologiques :

- 1 la ferritine forme de stockage du Fer dans la moelle osseuse, le foie et la rate essentiellement (61, 109) ;
- 2 l'hémosidérine, molécule amorphe contenant jusqu'à 35 % de Fer, assure son stockage lors de teneur tissulaire élevée (70) ;

3 la transferrine, forme de transport sérique du Fer (21) ;

4 les ferro-flavoprotéines interviennent dans le cycle citrique de dégradation du glucose.

L'intervention du Fer dans les processus cataboliques est beaucoup mieux connue que dans les processus anaboliques (61).

C Syndrome de carence

Les muqueuses et la conjonctive sont pâles (61). La concentration en hémoglobine et le volume globulaire chutent. L'anémie caractéristique associée à une carence en Fer est hypochrome et microcytaire (87). Le jeune est prédisposé à cette carence (61).

Le tableau clinique classique montre faiblesse et fatigue de l'animal (16), réduction de la résistance aux infections (109). Les performances physiques sont moindres, une tachycardie durable s'installe lors d'effort intense selon Lamand (61). Très rarement, on atteint un état de dépression (21).

D Syndrome d'intoxication

Lors de surcharge en Fer, la majeure partie du surplus se dépose dans le système réticulo-endothélial et/ou dans les cellules parenchymateuses. A partir d'un certain taux, cette accumulation entraîne des dommages organiques (44).

L'excès de Fer s'accompagne en premier lieu d'anorexie, de perte de poids (16, 87). Un état de diabète peut se développer, ainsi qu'une pigmentation cutanée, des signes d'insuffisance cardiaque.

Sur le plan clinique, une splénomégalie peut être notée, ainsi qu'une hépatomégalie. D'après Hercberg *et al* (44) :« Le risque de cancérisation hépatique est élevé. ».

VIII Magnésium

A Absorption et répartition

Le Magnésium fait partie des macro-éléments (16). Il possède la concentration minérale la plus élevée dans la cellule, après celle du potassium (69).

Kadzere *et al* (53) décrivent un antagonisme métabolique marqué avec le Calcium. Une concentration élevée du Calcium de la ration limite l'absorption du Magnésium (87). Ceci puisque les sites d'absorption du Magnésium et du Calcium sont les mêmes le long de l'intestin grêle (69).

B Rôles

1. Biochimiques

D'après Case *et al* (21), 60 à 70% du Magnésium de l'organisme se trouve sous forme de phosphate ou de carbonate dans les os. Cet élément est un composant essentiel de la structure squelettique et des dents (69). C'est le troisième minéral le plus important dans l'os, après le Calcium et le Phosphore (43).

Le Magnésium joue un rôle clé d'activateur (69) de nombreuses réactions enzymatiques du métabolisme énergétique (16). Dans certains tissus, il forme des complexes Mg-ATP, Mg-ADP ou Mg-AMP (69) utilisés comme source d'énergie dans les réactions métaboliques (21).

Ainsi, le Magnésium est essentiel pour le métabolisme intracellulaire des hydrates de carbone, des lipides et des protéines (43).

Le magnésium est, sous forme de cation, en équilibre de part et d'autre de la membrane cellulaire, comme le Sodium, le Potassium et le Calcium. Les échanges trans-membranaires entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule permettent la transmission des potentiels d'action puis la contraction musculaire. C'est pourquoi les fonctions du cœur, des muscles squelettiques et du système nerveux dépendent étroitement de sa présence.

Le Magnésium, en association avec la vitamine E, possède des effets antihistaminiques. Le couple peut être efficace contre l'inflammation cutanée chronique (115).

2. Physiologiques

Les domaines d'intervention du Magnésium, de part son implication dans de nombreuses réactions enzymatiques, sont divers (69) :

- a croissance ,
- b Immunité *et* allergie ,
- c contraction musculaire ,
- d survie des globules rouges ,
- e développement des tumeurs ,
- f métabolisme des tissus riches en collagène ,
- g métabolismes du Sodium et du Potassium.

C Syndrome de carence

Les carences en Magnésium sont rares chez le Chien comme chez le chat (21). Elles se caractérisent cliniquement dans ces espèces par :

- 1 une faiblesse musculaire (16),
- 2 de l'anorexie (87),
- 3 des vomissements (87),
- 4 une perte de poids (87),
- 5 une hyper-extension des membres antérieurs chez le chiot, pouvant mener à une ataxie (87),
- 6 un état d'irritabilité (87),
- 7 des convulsions dans les cas sévères (16).

D Syndrome d'intoxication

Les excès de Magnésium favorisent le développement de calculs de type phosphates ammoniacaux magnésiens chez le chat. Ceci à l'origine du syndrome de maladie du bas appareil urinaire dans cette espèce (16, 21).

IX Manganèse

A Absorption et répartition

L'absorption du manganèse a lieu tout au long de l'intestin grêle. Le Calcium, le Cobalt (43) et le Fer influencent ce passage. Le foie, les os, les reins et le pancréas présentent des concentrations supérieures en Manganèse, alors que le muscle est pauvre en cet élément.

Des excès de prise alimentaire de Manganèse peuvent conduire à une augmentation des concentrations plaires (72).

B Rôles

Le Manganèse fonctionne, ainsi que tous les autres éléments traces, en tant que constituant de métallo-enzymes et comme activateur d'enzymes (72).

Les enzymes contenant du Manganèse sont peu nombreuses. On peut néanmoins citer l'arginase (60), la pyruvate carboxylase, la Mn-superoxyde dismutase (21).

Les enzymes sensibles à l'activation par le Manganèse sont par contre nombreuses. Ce sont des hydrolases, des kinases, des décarboxylases et des transférases (43).

De façon plus générale, cet oligo-élément intervient :

- 1 dans la croissance osseuse (21) et cartilagineuse (43);
- 2 dans la reproduction (21), pour le développement et le bon fonctionnement des organes génitaux (60);
- 3 dans le métabolisme des lipides (21), pour la synthèse des phospholipides et des phosphatides (60);
- 4 dans le métabolisme des hydrates de carbone (72, 109) ;
- 5 dans le maintien de l'activité cellulaire, par antagonisme avec le Calcium (58) ;
- 6 dans le fonctionnement immunitaire, pour une synthèse correcte d'anticorps (58) ;
- 7 pour le développement et le bon fonctionnement cérébral (58);
- 8 pour la synthèse des mucopolysaccharides du cartilage (60) ;
- 9 dans la régulation de la glycémie (58).

C Syndrome de carence

Les deux symptômes caractéristiques de la carence en Manganèse sont des troubles tendineux (chez les volailles), et osseux (chez les bovins) d'après Lamand (60).

De plus, chez les jeunes, on peut observer des troubles de la démarche (ataxie) et de la croissance (16, 109). Chez les adultes, on note des boiteries avec épaissement des articulations, ainsi que des troubles de la fonction reproductrice (60, 109). Burger *et al* (16) décrivent aussi des anomalies dans le métabolisme des lipides lors de carence en Manganèse.

D Syndrome d'intoxication

Le manganèse est un métal peu toxique et le risque d'intoxication est faible. L'intoxication aiguë est anecdotique, l'intoxication chronique est plus fréquente (58). Pour observer une intoxication chez l'animal, l'exposition doit être longue car le foie est capable d'éliminer des quantités importantes de Manganèse (58). Si la surcharge est importante, on peut voir apparaître des symptômes nerveux, avec irritabilité voire agressivité. De plus, le Manganèse en excès peut avoir des conséquences sur la synthèse de l'hémoglobine (16), ceci suite à une compétition avec le Fer aux sites d'absorption intestinaux.

X Mercure

Il existe un antagonisme mutuel entre le Sélénium et le Mercure, mis à profit dans la lutte contre les intoxications par l'un de ces deux éléments (109).

Les reins sont les organes qui contiennent le plus de Mercure (75). Cet élément y est lié à une protéine non-histone, et surtout à une protéine de type métallothionéine. Des quantités toxiques de Mercure suppriment les phosphorylations oxydatives mitochondriales dans le rein. Cela provoque la mort des animaux (109).

Le Mercure agit comme un poison cumulatif. Les principaux symptômes de sa toxicité sont nerveux avec des tremblements, un état d'irritabilité et de dépression. Mais l'animal peut aussi présenter des symptômes de salivation importante, de stomatite et de diarrhée (75, 109).

XI Nickel

Le Nickel intervient dans la fonction membranaire et dans le métabolisme de l'ARN (109).

Cet élément est dit trace dans le NRC (87) car sa quantité requise dans l'alimentation du chien comme dans celle du chat est très faible. Ceci explique la rareté des carences en Nickel avec une ration classique.

Par ailleurs, des quantités relativement élevées de cet oligo-élément peuvent être absorbées sans entraîner d'effets secondaires (16). Le Nickel est relativement non toxique (109).

XII Plomb

Le Plomb pénètre dans l'organisme par voie digestive mais aussi par voie respiratoire et cutanée (75). L'absorption concerne 50% du Plomb ingéré chez les nouveau-nés. La rétention du Plomb ingéré dépend beaucoup des teneurs en Calcium, Fer, Cuivre et Zinc de la ration (109). Le Calcium et le Plomb ont les mêmes propriétés chimiques donc entrent naturellement en compétition au niveau des sites d'absorption (79). Lors de carence en Calcium, le Plomb sera plus facilement absorbé.

Le Plomb absorbé est stocké dans le squelette surtout (94% selon Mautino (79)), mais aussi dans le foie et les reins, organes très bien vascularisés.

Le Plomb inhibe les enzymes dont l'activité demande la présence de groupes sulfhydryl libres. Par exemple, il perturbe la synthèse du hème.

L'intoxication par le Plomb est l'empoisonnement le plus fréquent chez les animaux de rente, surtout chez les bovins (25). Alors :

- a une anémie s'installe (109) suite à l'inhibition de la synthèse de l'hème mais aussi par fragilisation des globules rouges lors d'intoxication,
- b s'ensuit un état de fatigue, de faiblesse, de léthargie avec insomnies (99)
- c le fonctionnement cardiaque se détériore (75),
- d un dysfonctionnement rénal peut apparaître, traduit par glycosurie et protéinurie (109),
- e les animaux sont plus sensibles aux infections,
- f des tremblements peuvent apparaître.

Ces symptômes d'intoxication par le Plomb peuvent être aggravés par des carences en Calcium, en Fer (109), en Chrome (99). Le Cuivre présente aussi un antagonisme métabolique avec le Plomb. Par contre, le Zinc en excès dans la ration semble favoriser l'absorption du Plomb (109).

XIII Sélénium

A Absorption et répartition

Les formes alimentaires du Sélénium sont résorbées très efficacement, au niveau du duodénum surtout. L'élément absorbé va subir une métabolisation réductrice permettant la synthèse de dérivés physiologiquement actifs tels que la glutathion peroxydase (85). Les lieux de stockage du Sélénium sont prioritairement les muscles, mais aussi le foie, les reins, le sang et les os.

B Rôles

1 Le Sélénium, composant de la glutathion peroxydase, protège les membranes biologiques de l'oxydation en empêchant la formation des radicaux libres (60). La glutathion peroxydase peut réduire les peroxydes lipidiques, même en activité (85).

Les acides aminés soufrés entrent, comme le Sélénium, dans la composition de la glutathion peroxydase. La vitamine E agit en parallèle à cette enzyme, à l'intérieur de la membrane cellulaire, en empêchant l'oxydation des lipides (16). Les fonctions de ces trois nutriments (acides aminés soufrés, vitamine E et Sélénium) sont très liées.

2 D'autre part, le Sélénium intervient dans le métabolisme de nombreux composés exogènes, par l'intermédiaire d'enzymes hépatiques de métabolisation des xénobiotiques. Il peut ainsi contrôler leur toxicité.

3 De plus, le Sélénium interagit avec de nombreux minéraux dans l'organisme (Cadmium, Mercure, Cuivre, Plomb). Il peut plus ou moins moduler leurs effets toxiques.

4 Et puis, cet élément régule et améliore l'immunité en maintenant l'intégrité des cellules immunocompétentes.

5 Enfin, en régulant le métabolisme de l'acide arachidonique, le Sélénium est capable de moduler l'agrégation plaquettaire.

6 Le Sélénium a aussi un rôle vital de contrôle des enzymes de type déiodinases qui régulent la conversion de T4 en T3 (43).

C Syndrome de carence

La déficience n'a pas été reportée cliniquement chez le chien et le chat (43).

D Syndrome d'intoxication

A haute dose, le Sélénium est toxique pour les appareils cardiovasculaire, respiratoire, urinaire et aussi pour le tissu lymphoïde (46).

Les symptômes sont divers, on peut observer d'après Mac Dowell (74) :

- douleur abdominale,
- ptyalisme,
- vomissements,
- dyspnée,
- paralysie,
- puis mort par insuffisance respiratoire.

XIV Zinc

A Absorption et répartition

Le Zinc est absorbé au niveau de l'intestin grêle, lié à une métallo-thionéine. Le Calcium, le Cuivre (21), le Cadmium et le Chrome de la ration peuvent diminuer la quantité de Zinc absorbé (73). Dans l'organisme, le Zinc est réparti de façon homogène, mais des concentrations supérieures ont été mises en évidence dans la peau et les poils (17, 73).

B Rôles

Le Zinc est un constituant ou un activateur pour plus de 200 enzymes (43), il intervient dans le fonctionnement de plus de 70 métallo-enzymes (107) :

1 Au sein de l'anhydrase carbonique ou de carboxypeptidases, il participe au métabolisme des hydrates de carbone.

2 Avec la lactate déshydrogénase il intervient dans le métabolisme des lipides.

3 Associé à la phosphatase alcaline ou à une aminopeptidase, il prend part au métabolisme des protéines, plus particulièrement à leur synthèse (43).

4 Cofacteur de la superoxyde dismutase, il protège les cellules contre l'oxydation par les radicaux libres (39).

5 Il participe à la synthèse de l'ARN au sein de la thymidine kinase (39), il prend part au métabolisme des acides (43).

De façon plus générale, l'élément Zinc intervient :

1 pour assurer une bonne immunité (65) ;

2 au niveau épidermique, pour réguler la kératogenèse (12, 24), la cicatrisation cellulaire (17) et assurer l'intégrité de la peau (43);

3 pour préserver l'intégrité du goût et de l'odorat (24) ;

4 dans la protection cellulaire : différenciation (51) et intégrité (13) ;

5 pour assurer la fonction de reproduction (24, 43).

C Syndrome de carence

Chez le chat, le NRC (88) décrit les signes de carence suivants :

- Emaciation,
- Décoloration des poils,
- Dysfonctionnement testiculaire,
- Abattement général,
- Retard de croissance chez les chatons.

D Syndrome d'intoxication

Le Zinc est relativement peu toxique, ce sont les interactions qu'il peut avoir avec d'autres minéraux (Fer et Cuivre) qui sont à l'origine du syndrome d'intoxication (43).

L'excès de Zinc n'a pas été décrit chez le chat (88).

Troisième partie : ELEMENTS MINERAUX ET ANALYSES PILAIRES CHEZ LE CHAT : ETUDE EXPERIMENTALE

Introduction

Les analyses pilaires sont effectuées depuis les années 1970, mais leur application est quasi inexistante. Les problèmes concernent essentiellement l'absence de standardisation des méthodes de prélèvement et de lavage. Mais aussi le manque de données quant aux valeurs de référence en ce qui concerne les résultats. En plus de tous les risques de variation selon la technique de l'expérience, l'absence de standard démontré rend la plupart des résultats non interprétables.

Dans cette expérience, notre objectif est de déterminer la valeur moyenne et l'intervalle de confiance des différents minéraux mesurés dans les analyses pilaires classiques.

Le deuxième objectif est la mise en évidence de facteurs de variation de ces résultats. Afin de tester l'influence de la période de prélèvement, l'expérience est réalisée deux fois à un an d'intervalle. Puis, nous vérifions l'importance du mode de prélèvement pour les résultats en récupérant pour chaque chat des poils coupés et des poils de mue.

I Matériel et méthodes

A Les animaux

Les analyses ont été réalisées sur 11 chattes. Neuf sont issues de croisements entre abyssin et européen, deux sont de race american shorthair. Leur origine est proche (la plupart sont sœurs). Le mode de vie de ces chats est suivi depuis leur plus jeune âge.

Leur alimentation est parfaitement connue et homogène depuis plus de trois ans : Feline Maintenance de Science Plan (composition en annexe I). La concentration en oligo-éléments de cet aliment complet nous a été communiquée par le fabricant (*) :

Cuivre	26 ppm
Fer	266 ppm
Manganèse	17,5 ppm
Sélénium	0,7 ppm
Zinc	266 ppm

(*) Hill's Pet Nutrition BP 221
06904 Sophia Antipolis

Ce groupe de chats a subi deux types de prélèvements, ceci deux fois à un an d'intervalle.

B Les prélèvements

Tout d'abord, une coupe de poils a été réalisée au niveau de l'encolure, entre les deux omoplates. Les ciseaux étaient en acier inoxydable, sans autre métal associé. Ils étaient nettoyés systématiquement entre deux chats. La première coupe a été effectuée en décembre 1999.

Des poils issus d'un brossage complet journalier de ces animaux ont aussi été récoltés. La brosse est en bois verni avec des brins en plastique. La récolte a été réalisée sur les trois mois suivant la coupe.

Douze mois plus tard, les mêmes prélèvements ont été réalisés, sur les 11 même chats. La coupe a été réalisée au même site.

Les échantillons pesaient au moins 1 gramme pour chaque animal et pour chaque type de prise. Chacun a été isolé, identifié, et adressé sous enveloppe fermée au laboratoire.

C Le traitement au laboratoire

Les échantillons ont été analysés selon la technique du capi-métallo-gramme utilisée en routine par le laboratoire d'analyses biologiques SEROM (§). Les poils sont lavés dans l'acétone et dans l'eau pour éliminer toute trace de contamination extérieure. Ils sont alors séchés puis minéralisés avant d'être analysés par spectrométrie d'émission. Le principe de l'appareillage est développé en annexe II. La figure 15 résume le protocole analytique.

Les résultats d'analyse sont exprimés en micro-grammes d'élément par gramme de poils, sous forme d'un histogramme horizontal. Un exemple de feuille de résultats est présenté en annexe III. Les éléments mesurés sont au nombre de 14 : Aluminium, Cadmium, Calcium, Chrome, Cobalt, Cuivre, Fer, Magnésium, Manganèse, Mercure, Nickel, Plomb, Sélénium, Zinc.

§ Société d'Etudes et de Recherches en Oligo-éléments et Minéraux
Z.A. « La haute Limouillère »
Rue Edouard Branly B.P. 28
37230 FONDETTES
FRANCE

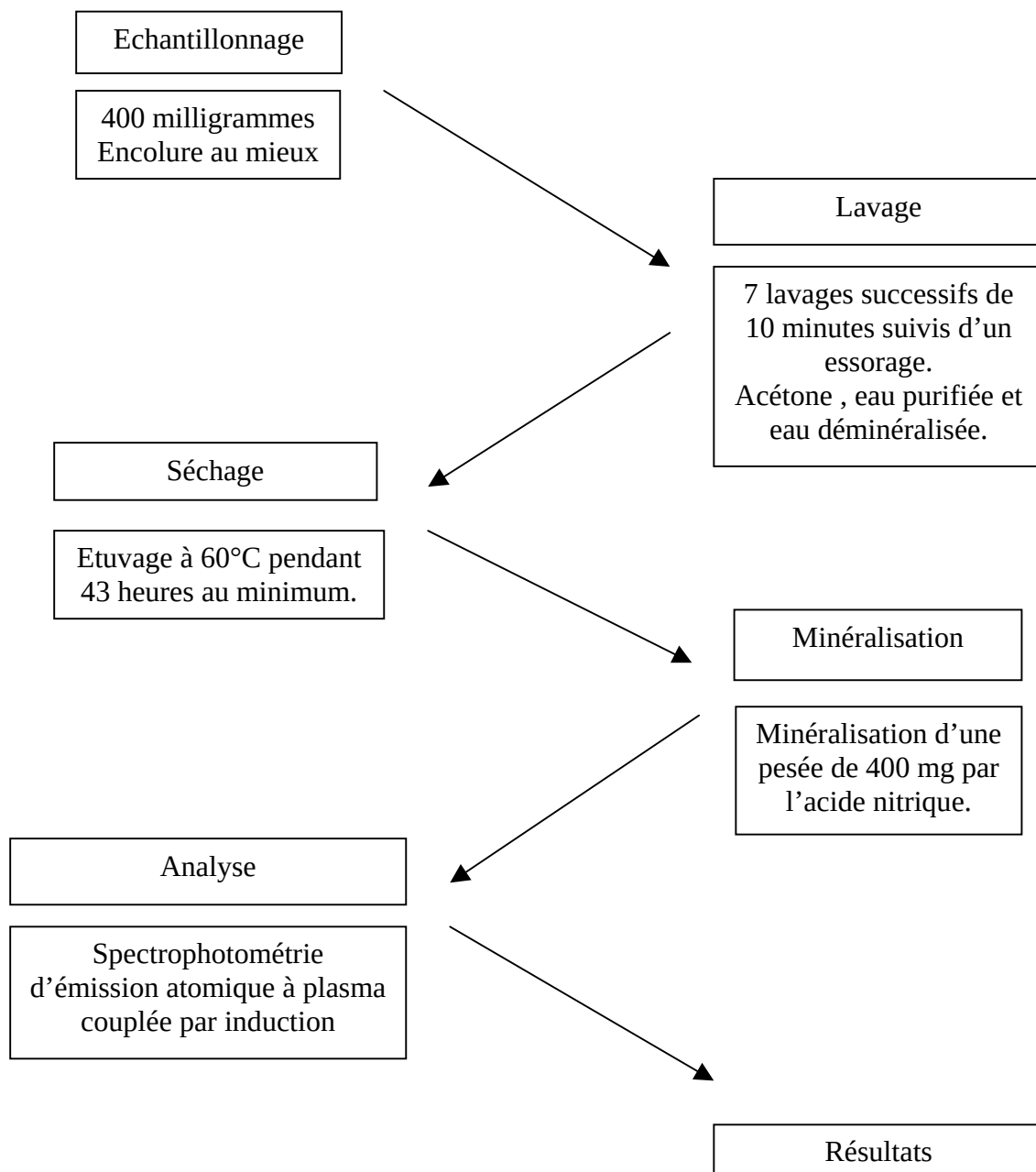


Figure 15 : Méthode d'analyse

D La méthode d'analyse des résultats

1. Etablissement de normes

Afin d'établir des normes de résultats, nous avons calculé la moyenne et l'écart type sur l'ensemble des résultats félins obtenus, quelle que soit l'année, quel que soit le mode de prélèvement.

Et puis, pour pouvoir comparer nos résultats aux références utilisées par le laboratoire SEROM, nous avons établi les intervalles de confiance pour chaque minéral. Les valeurs seuil de l'intervalle se calculent en ajoutant ou en retranchant à la moyenne la valeur de l'écart type multiplié par t (variable de student) et divisé par la racine de l'effectif.

2. Etude des facteurs de variation

Pour tester simultanément l'ensemble des données, nous avons effectué une analyse de variance à deux facteurs : l'année et le type de prélèvement. Le matériel informatique statistique utilisé est la procédure ANOVA au sein du système SAS.

Ce support est adapté puisqu'il réalise une analyse de variance à partir des données issues d'une grande variété de plans expérimentaux équilibrés. Les expériences sont dites équilibrées puisque pour chaque année et pour chaque type de prélèvement, le lot a la même taille, ici 11 échantillons.

Afin de préciser l'influence du protocole sur les résultats, les intervalles de confiance ont été calculés à partir des données concernant les poils de mue et les poils coupés, indépendamment. La comparaison aux références utilisées par le laboratoire permettra de connaître le mode de prélèvement auxquelles elles s'appliquent le mieux.

II Résultats

A Etablissement de normes

1. Moyennes

Le tableau I transcrit les moyennes et les écart types globaux (quelle que soit l'année et le type de prélèvement) des concentrations pilaires obtenues dans notre étude.

Les concentrations pilaires les plus fortes obtenues concernent :
le Calcium (956 µg par gramme de poil),
le Zinc (152 µg) et

le Magnésium (146 µg).

Trois éléments présentent des teneurs supérieures à 10 µg par gramme de poil. Ce sont :

le Fer (27,6 µg),
l'Aluminium (11,4 µg)
et le Cuivre (11 µg).

Cinq éléments ont des concentrations pilaires comprises entre 1 et 5 µg par gramme :

le Mercure (4,97 µg),
le Nickel (3,34 µg),
le Plomb (2,73 µg),
le Cobalt (2,16 µg)
et le Chrome (1,1 µg).

Les trois derniers éléments :

le Sélénium (0,87 µg),
le Manganèse (0,48 µg) et
le Cadmium (0,18 µg),

présentent tous des teneurs inférieures à 1 µg dans 1 gramme de poils.

2. Ecart types

Les écart types mesurés sont d'importance relative variable selon les éléments. Le Cadmium présente, pour une moyenne de 0,18 µg, un très grand écart type (0,17 soit 94% de la moyenne).

Quatre éléments présentent des écart types correspondant à plus de 60 % de leur moyenne pilaire :

le Plomb 67%,
le Fer 63%,
l'Aluminium 61%,
le Chrome 60 %.

Trois minéraux ont des écart types mesurés entre 30 et 50 % de leur moyenne pilaire. Ce sont :

le Manganèse avec 48%,
le Magnésium avec 45%,
le Calcium avec 33%.

Enfin, cinq oligo-éléments présentent une variabilité de leur concentration pilaire peu importante avec un écart type de 15 % environ de la valeur de leur moyenne :

le Nickel 18%,
le Cuivre 17%,
le Cobalt et le Zinc 12%,
le Sélénium 11%,
le Mercure 10%.

Tableau I : Moyennes et écart types obtenus sur l'ensemble des analyses des 11 chats sains

Elément	Moyenne	Ecart type
Aluminium	11,4	6,90
Cadmium	0,18	0,17
Calcium	954	316
Chrome	1,10	0,66
Cobalt	2,16	0,26
Cuivre	11,0	1,85
Fer	27,6	17,4
Magnésium	146	66,4
Manganèse	0,48	0,23
Mercure	4,97	0,50
Nickel	3,34	0,59
Plomb	2,73	1,84
Sélénium	0,87	0,10
Zinc	152	19,0

3. Intervalles de confiance

Les intervalles de confiance calculés sur les résultats de concentrations pilaires de notre étude sont rassemblés dans le tableau II. Est mis en parallèle l'intervalle utilisé par le laboratoire SEROM comme normal chez le chat.

Les intervalles les plus larges correspondent aux éléments dont le taux moyen est le plus élevé. C'est le cas notamment pour :

du Calcium [744 – 1163],
du Zinc [139 – 164],
et du Magnésium [102 – 198].

Et, à un moindre degré : du Fer [16 – 39],
du Plomb [1,51 – 3,95],
du Cuivre [9,8 – 12,3],
et de l'Aluminium [6,86 – 15].

Les intervalles de teneurs pilaires de confiance les plus précis concernent :

le Cadmium [0,07 – 0,29],
le Chrome [0,66 – 1,54],
le Cobalt [1,99 – 2,33],
le Manganèse [0,33 – 0,63],
le Nickel [2,65 – 3,73],
le Sélénium [0,8 – 0,94],
et le Mercure [4,64 – 5,3].

Ils sont tous plus étroits que 1µg d'élément.

B Etude du paramètre «année de prélèvement » :

Les résultats analytiques sont rapportés dans le tableau III. D'une année sur l'autre, les moyennes de concentrations pilaires de nos chats ont changé significativement pour les éléments :

- Chrome : 0,89 µg en 1999 différent de 1,32 µg en 2000 ($p<0,01$),
- Fer : 31,6 µg différent de 23,5 µg ($p<0,05$),
- Mercure : 5,18 µg différent de 4,75 µg ($p<0,005$),
- Plomb : 2,11 µg différent de 3,34 µg ($p<0,05$),
- et Sélénium : 0,93 µg différent de 0,81 µg ($p<0,0001$).

La différence la plus significative entre 1999 et 2000 concerne l'élément Sélénium ($p<0,0001$).

Tableau II : Comparaison entre les intervalles de confiance de concentration pilaire obtenus sur nos chats sains et ceux utilisés par le laboratoire SEROM.

Eléments	Intervalle de confiance calculé à partir des résultats de notre étude	Intervalle de normalité utilisé par le laboratoire SEROM
Aluminium *	6,86 – 15	0 – 50
Cadmium *	0,07 – 0,29	0 – 1
Calcium	744 – 1163	600 – 1800
Chrome	0,66 – 1,54	0,1 – 1,0
Cobalt	1,99 – 2,33	0,7 – 2,3
Cuivre	9,8 - 12,3	5 – 15
Fer	16 – 39	25 – 135
Magnésium	102 – 198	25 – 185
Manganèse	0,33 – 0,63	0,4 – 1,6
Mercure *	4,64 – 5,30	0 – 10
Nickel	2,95 – 3,73	1,5 – 4,5
Plomb *	1,51 – 3,95	0 – 15
Sélénium	0,80 – 0,94	0,5 – 15
Zinc	139 – 164	75 - 195

* Pour les quatre polluants que sont l'Aluminium, le Cadmium, le Mercure et le Plomb, il est possible de prendre comme valeur basse 0. On ne peut en effet pas considérer comme anormal un animal dont le taux pour un de ces éléments serait nul.

Tableau III : Moyennes des concentrations pilaires +/- écart type pour chaque élément en fonction de l'année de prélèvement chez le chat.

Elément	Année 1999	Année 2000
Aluminium	12,2 ^a +/- 7,73	10,7 ^a +/- 6,02
Cadmium	0,17 ^a +/- 0,2	0,20 ^a +/- 0,15
Calcium	970 ^a +/- 350	937 ^a +/- 284
Chrome	0,89 ^a +/- 0,3	1,32 ^b (p< 0,01) +/- 0,84
Cobalt	2,19 ^a +/- 0,28	2,12 ^a +/- 0,24
Cuivre	11,1 ^a +/- 2,1	11,0 ^a +/- 1,6
Fer	31,6 ^a +/- 21,2	23,5 ^b (p< 0,05) +/- 11,6
Magnésium	146 ^a +/- 73,3	145 ^a +/- 60,5
Manganèse	0,48 ^a +/- 0,26	0,47 ^a +/- 0,21
Mercure	5,18 ^a +/- 0,42	4,75 ^b (p< 0,005) +/- 0,49
Nickel	3,36 ^a +/- 0,52	3,32 ^a +/- 0,67
Plomb	2,11 ^a +/- 1,63	3,34 ^b (p< 0,05) +/- 1,86
Sélénium	0,93 ^a +/- 0,08	0,81 ^b (p< 0,0001) +/- 0,08
Zinc	149 ^a +/- 20,6	155 ^a +/- 17,1

C Etude du facteur «mode de prélèvement » :

Les résultats analytiques sont rapportés dans le tableau IV. Les éléments montrant des teneurs différentes dans les poils selon le mode de prélèvement de ces phanères sont nombreux. Au nombre de 8, ce sont :

- l'Aluminium : 17,2 dans les poils de mue différent de 5,6 dans les poils coupés ($p < 0,0001$),
- le Calcium : 828 différent de 1080 ($p < 0,0001$),
- le Chrome : 1,34 différent de 0,86 ($p < 0,005$),
- le Cuivre : 12,3 différent de 9,8 ($p < 0,0001$),
- le Fer : 40,5 différent de 14,6 ($p < 0,0001$),
- le Magnésium : 103 différent de 188 ($p < 0,0001$),
- le Manganèse : 0,67 différent de 0,28 ($p < 0,0001$)
- et le Nickel : 3,51 différent de 3,17 ($p < 0,05$).

La concentration en ces minéraux est moindre dans les poils coupés, sauf pour le Calcium et le Magnésium.

Les intervalles de référence mesurés pour chaque type de prélèvement sont présentés dans le tableau V. Ils sont relativement différents pour 7 éléments.

1 L'Aluminium se trouve entre 4,91 et 6,35 μg dans les poils coupés et entre 13,9 et 20,6 μg dans les poils de mue.

2 Le calcium pilair des poils coupés est dans l'intervalle [852 – 1308], bien différent de l'intervalle des poils de mue [675 – 981].

3 Le Chrome se situe entre 0,49 et 1,23 μg dans les poils coupés et entre 0,9 et 1,78 μg dans les poils de mue.

4 Le Cuivre pilair se trouve entre 9 et 10,6 μg dans les poils coupés et dans l'intervalle [11,3 - 13,3] dans les poils de mue.

5 Le Fer se situe entre 11,1 et 18,1 μg dans les poils coupés et entre 30,3 et 50,8 μg dans les poils de mue.

6 Le Magnésium se situe entre 146 et 230 μg dans les poils coupés, entre 80,4 et 126 μg dans les poils de mue.

7 Le Manganèse a une concentration pilair située entre 0,25 et 0,31 μg dans les poils coupés, alors qu'elle se trouve dans l'intervalle [0,56 – 0,78] dans les poils de mue.

Tableau IV : Moyennes des concentrations pilaires +/- écart type pour chaque élément en fonction du type de prélèvement chez le chat

Elément	Poils de mue	Poils coupés
Aluminium	17,2 ^a +/- 5,05	5,6 ^b (p<0,0001) +/- 1,09
Cadmium	0,18 ^a +/- 0,2	0,19 ^a +/- 0,15
Calcium	828 ^a +/- 231	1080 ^b (p<0,0001) +/- 343
Chrome	1,34 ^a +/- 0,67	0,86 ^b (p<0,005) +/- 0,56
Cobalt	2,12 ^a +/- 0,29	2,19 ^a +/- 0,23
Cuivre	12,3 ^a +/- 1,52	9,8 ^b (p<0,0001) +/- 1,2
Fer	40,5 ^a +/- 15,4	14,6 ^b (p<0,0001) +/- 5,24
Magnésium	103 ^a +/- 34,5	188 ^b (p<0,0001) +/- 63,8
Manganèse	0,67 ^a +/- 0,17	0,28 ^b (p<0,0001) +/- 0,05
Mercure	4,98 ^a +/- 0,5	4,95 ^a +/- 0,52
Nickel	3,51 ^a +/- 0,71	3,17 ^b (p<0,05) +/- 0,39
Plomb	2,48 ^a +/- 1,67	2,97 ^a +/- 2
Sélénium	0,86 ^a +/- 0,1	0,88 ^a +/- 0,11
Zinc	147 ^a +/- 17,2	156 ^a +/- 20

Les intervalles de confiance sont très proches entre coupe et mue pour les résultats concernant respectivement :

- 1 le Cadmium : [0,09 – 0,29] et [0,05 – 0,31].
- 2 le Cobalt : [2,04 – 2,34] et [1,93 – 2,31],
- 3 le Mercure : [4,61 – 5,29] et [4,65 – 5,31],
- 4 le Nickel : [2,91 – 3,43] et [3,04 – 3,98],
- 5 le Plomb : [1,64 – 4,3] et [1,37 – 3,59],
- 6 le Sélénium : [0,81 – 0,95] et [0,79 – 0,93],
- 7 le Zinc : [143 – 169] et [136 – 159],

III Discussion

Le support d'analyse, constitué de 11 chats du même sexe, d'âge et d'origine proches, permet de diminuer au maximum la variabilité physiologique des résultats. Par ailleurs, le bon suivi de ces animaux permet d'affirmer la constance de la ration distribuée et l'absence de traitement médical, de shampooings. Les teneurs mesurées dans les poils sont ainsi les plus précises possibles (62).

A Norme de référence

Certains écart types, relativement faibles par rapport à la moyenne de l'élément correspondant, traduisent des résultats fiables. C'est le cas du Cobalt, du Cuivre, du Mercure, du Nickel, du Sélénium et du Zinc.

La plupart de nos intervalles de confiance (11 sur 14) sont inclus dans les normes de SEROM, tout en étant beaucoup plus étroits donc plus précis. Par exemple le Cadmium présente un intervalle calculé de [0,07 – 0,29] contre un intervalle utilisé au laboratoire de [0 – 1]. Le Fer donne [16 – 39] contre [25 – 135] chez SEROM. Enfin le Plomb pile se trouve dans l'intervalle [1,51 – 3,95] dans notre étude, entre 0 et 15 µg selon les normes du laboratoire.

L'intervalle de confiance du Manganèse de notre étude montre une valeur seuil inférieure plus basse [0,33 - 0,63] que celle du laboratoire [0,4 - 1,6].

Deux intervalles calculés ont des valeurs seuil supérieures plus importantes que celles admises par le laboratoire. Ce sont ceux :

- du Chrome : [0,66 – 1,54] contre [0,1 – 1]
et du Magnésium : [102 – 198] contre [25 – 185].

Les normes que le laboratoire SEROM utilise depuis longtemps ne semblent ni assez précises ni adaptées aux demandes actuelles. Des analyses systématiques sur un grand nombre de chats sains seraient intéressantes pour l'établissement de normes plus récentes chez le chat.

Tableau V : Intervalles de confiance mesurés selon le mode de prélèvement et normes utilisées par le laboratoire

Elément	Intervalle de confiance des résultats sur poils coupés	Intervalle de confiance des résultats sur poils de mue	Intervalle de confiance utilisé par SEROM
Aluminium *	4,91 – 6,35	13,9 – 20,6	0 – 50
Cadmium *	0,09 – 0,29	0,05 – 0,31	0 – 1
Calcium	852 – 1308	675 – 981	600 – 1800
Chrome	0,49 – 1,23	0,90 – 1,78	0,1 – 1
Cobalt	2,04 – 2,34	1,93 – 2,31	0,7 – 2,3
Cuivre	9 – 10,6	11,3 – 13,3	5 – 15
Fer	11,1 – 18,1	30,3 – 50,8	25 – 135
Magnésium	146 – 230	80,4 – 126	25 – 185
Manganèse	0,25 – 0,31	0,56 – 0,78	0,4 – 1,6
Mercure *	4,61 – 5,29	4,65 – 5,31	0 – 10
Nickel	2,91 – 3,43	3,04 – 3,98	1,5 – 4,5
Plomb *	1,64 – 4,30	1,37 – 3,59	0 – 15
Sélénium	0,81 – 0,95	0,79 – 0,93	0,5 – 15
Zinc	143 - 169	136 – 159	75 - 195

* Pour les quatre polluants que sont l'Aluminium, le Cadmium, le Mercure et le Plomb, il est possible de prendre comme valeur basse 0. On ne peut en effet pas considérer comme anormal un animal dont le taux pour un de ces éléments serait nul.

B Année de prélèvement

La modification des concentrations pilaires du même chat d'une année sur l'autre peut s'expliquer de différentes manières.

Le Mercure et le Plomb sont des métaux lourds qui s'accumulent avec le temps, ils sont probablement plus présents après un an.

Ces 2 métaux peuvent aussi se trouver dans le milieu extérieur et se fixer aux phanères, au même titre que le Fer et le Chrome. Néanmoins, il est à noter que les chats de cette expérience se trouvent en milieu clos, normalement non soumis aux polluants de l'environnement.

C Mode de prélèvement

1. Comparaison de moyennes

Six des 14 oligo-éléments étudiés sont en quantité inférieure dans les poils coupés. Ce sont l'Aluminium, le Chrome, le Cuivre, le Fer, le Manganèse et le Nickel.

Ceci peut simplement être dû à leur présence au niveau du club, associé au poil de mue seulement. Ces éléments interviennent dans de nombreuses réactions métaboliques. Ils sont activateurs enzymatiques ou constituants de métallo-enzymes. Il semble logique qu'ils soient plus concentrés dans les cellules de la base du poil.

Le Cuivre, par exemple, participe à la synthèse de la mélanine, au sein des mélanocytes du bulbe pileux. Cet élément est donc peut-être concentré dans le club du poil complet.

Par ailleurs, le poil du chat tombe le plus souvent avec l'aide du léchage. La composition de la salive en oligo-éléments est mal connue, mais peut-être apporte-t-elle des oligo-éléments tels que l'Aluminium, le Chrome, le Fer ou le Manganèse...

Par contre, le Magnésium et le Calcium, plus concentrés dans les poils coupés, sont peut-être apportés par les mains de l'expérimentateur, par la paire de ciseaux ...

Il est à noter aussi que les poils coupés proviennent uniquement de l'encolure, entre les omoplates plus précisément, alors que la mue, en mosaïque chez le chat, concerne l'ensemble du corps.

Les poils de mue sont prélevés sur plusieurs semaines afin d'en obtenir la même quantité que par une coupe ponctuelle. La variabilité temporelle évoquée dans le paragraphe «année de prélèvement» entre donc en ligne de compte.

Enfin, la mue de printemps concerne essentiellement le sous-poil, alors que les poils coupés sont plutôt les poils principaux, les plus longs. Les deux échantillons

contiendraient deux types de poils différents, dont la composition n'est peut être pas identique.

La réalisation de deux types de prélèvement provoque des différences de concentration en 8 minéraux. Certains biais peuvent expliquer partiellement cette variation : site d'origine du poil, période de croissance du poil, intervention du manipulateur.

2. Comparaison d'intervalles

L'intervalle de normalité utilisé par le laboratoire SEROM est cohérent avec nos intervalles de confiance pour la mue et la coupe dans la grande majorité des cas.

Les concentrations en élément Chrome fournissent un seuil maximum supérieur dans nos résultats au seuil retenu par le laboratoire :

- 1,23 µg pour les poils coupés,
- 1,78 µg pour les poils de mue,
- 1 µg selon SEROM.

Le macro-élément Magnésium présente une borne supérieure dans les poils coupés (230 µg) qui dépasse celle admise par le laboratoire (185 µg).

Puis, les résultats normaux du SEROM ne contiennent pas nos résultats sur poils coupés pour deux éléments :

- le Manganèse : [0,25 – 0,31] n'appartient pas à [0,4 – 1,6],
- et le Fer : [11,1 – 18,1] n'appartient pas à [25 – 135].

Les intervalles de normalité utilisés par le laboratoire SEROM sont dans l'ensemble plus adaptés aux résultats obtenus sur poils de mue. Ils restent néanmoins cohérents avec tous nos résultats.

IV Conclusion

D'après les résultats de notre étude sur 11 chats, certaines concentrations minérales changent d'une année sur l'autre, et/ou selon le mode de prélèvement. Il est à noter que les teneurs pilaires en Chrome et en Fer sont très sensibles, puisqu'elles changent avec les deux variables.

Les facteurs pouvant provoquer cette variabilité sont nombreux :

- a** la contamination par le milieu,
- b** la contamination par le manipulateur,
- c** la contamination par les outils de prélèvement,
- d** la contamination par la salive,

e la modification de la période de prélèvement, les poils n'ayant alors pas poussé sur le même temps,
f la différence de type de poil prélevé,
g la variation du site d'origine du poil...

Autant d'éléments nous permettant de comprendre pourquoi les résultats d'une analyse pilaire isolée sont si difficilement interprétables.

Des analyses pilaires, pour devenir intéressantes, doivent être très rigoureuses. Le contrôle des locaux, des traitements et du protocole appliqué est nécessaire au maintien de conditions expérimentales semblables.

Notre étude féline donne des intervalles de confiance beaucoup plus précis que ceux choisis comme normaux par le laboratoire français SEROM assurant les analyses pilaires. Il serait intéressant d'effectuer une étude systématique sur un plus grand nombre de chats sains afin d'établir des normes précises et définitives qui deviendraient la référence féline.

Quatrième partie : MINÉRAUX PILAIRES CHEZ LE CHIEN : ETUDE EPIDEMIOLOGIQUE

Introduction

Comme nous l'avons vu, les oligo-éléments interviennent dans de nombreuses voies métaboliques. Leurs rôles nombreux en tant que co-enzymes leur confère une place polyvalente au sein de l'organisme. Toute carence et tout excès se soldera inéluctablement par des perturbations plus ou moins marquées, plus ou moins diversifiées.

Dans un premier temps, nous exposerons les signes de carence et d'excès en minéraux caractéristiques du chien. Le syndrome n'est pas spécifique pour tous les éléments. Parfois, les symptômes sont communs à toutes les espèces. Il faudra alors se reporter à la présentation générale des oligo-éléments de la deuxième partie.

Le dépôt des oligo-éléments au sein des phanères confère à ce tissu un rôle de mémoire de l'imprégnation de l'organisme, sur une longue période. De plus, l'étude des poils présente une facilité de prélèvement et de stockage non négligeable. Mais l'interprétation des résultats est rendue difficile par les nombreuses sources de variation.

Le prélèvement de chiens sains connus a pour objectif premier d'établir des normes de résultats de concentrations pilaires. Les intervalles de confiance obtenus dans notre étude pourront ensuite être comparés aux normes couramment admises par le laboratoire SEROM.

Par ailleurs, certains facteurs individuels vont pouvoir être testés, tels que la race, la couleur et le sexe. L'influence d'éléments extérieurs comme l'alimentation et l'élevage d'origine sera aussi vérifiée.

Notre étude essaye de rendre interprétable une analyse pilaire canine dans un cadre pathologique. Nous allons tenter de mettre en évidence des différences notables entre les concentrations pilaires d'animaux sains versus celles d'animaux malades. Ainsi, nous verrons si la maladie, de façon générale, provoque des variations de la teneur pilaire en un ou plusieurs oligo-éléments. Nous pourrons aussi mettre en parallèle différentes affections sur le support des modifications pilaires induites. Le but est de disposer d'un paramètre supplémentaire aidant au diagnostic du statut physiologique d'un chien. Alors, l'intérêt de l'analyse pilaire en médecine vétérinaire sera un peu mieux appréhendé.

I Les minéraux chez le chien

A Carence en Calcium chez le chien

La carence en Calcium se traduit chez le chien par :

- a une hyperplasie progressive des parathyroïdes ;
- b une ostéoporose touchant en priorité les os plats du crâne, puis les côtes et les vertèbres, enfin les os longs (87), Des déchaussements de dents peuvent apparaître, précédant des compressions de vertèbres ou des fractures spontanées des os longs ;
- c un état de tétanie voire des convulsions ;
- d des troubles dans la fonction de reproduction ;
- e une parésie en post-partum (53).

B Cuivre chez le chien

1. Syndrome de carence

Zentek et Meyer (117) ont décrit la clinique de la carence en Cuivre chez des chiots. Le premier signe a été la décoloration des poils de la tête qui sont devenus gris (43), 3 mois après le début de la carence alimentaire. Au bout du quatrième mois, une hyper-extension des phalanges distales des membres antérieurs a été notée (43).

Underwood (109) note une anémie normochrome normocytaire hyporégénérative chez le chien carencé en Cuivre. Selon son étude, la dépigmentation du poil est un élément plus sensible que l'anémie dans cette espèce, puisqu'elle peut s'observer après deux jours de carence. De même, la croissance et l'aspect du poil sont modifiés suite à la diminution des apports nutritionnels aux follicules pileux, conséquence directe de l'anorexie.

2. Syndrome d'intoxication

Une anomalie génétique des bedlington terriers rendrait ces chiens beaucoup plus sensibles aux excès de Cuivre (87), par une anomalie du drainage hépatique. Les races west highland white terrier, doberman et cocker spaniel pourraient aussi être concernées par cette maladie chronique dégénérative (21).

C Carence en Fer chez le chien

En plus de la clinique commune à toutes les espèces, les chiens carencés montrent systématiquement un état d'anémie et d'anoxie tissulaire (87).

D Carence en Sélénium chez le chien

Le NRC (87) relate lors de carence chez le chien :

- une faiblesse musculaire, les animaux ne peuvent parfois plus se lever (60) ;
- un œdème sous-cutané ;
- de l'anorexie ;
- une dépression (74) ;
- une dyspnée ;
- une tachycardie (60) ;
- un coma éventuel.

Sur le plan histologique, les tissus des chiens carencés mettent en évidence :

- une dégénérescence des muscles squelettiques (109);
- une nécrose du myocarde (87);
- une minéralisation rénale.

E Zinc chez le chien

1. Syndrome de carence

a) Symptômes cutanés

Le syndrome de carence en Zinc se caractérise en premier lieu, d'après le NRC (87) par des lésions de la peau de l'abdomen et des extrémités. Elle est peu fréquente (24), se traduit surtout par des symptômes cutanés :

- hyperkératose,
- alopecie,
- érythème (107),
- desquamation,
- croûtes,
- poil terne et dur, hérissé et peu dense (21).

b) Symptômes généraux

La clinique générale apparaît dans un second temps d'après le NRC (87), elle est variée (107). Le chien présente :

- 1 anorexie ;

2 agueusie (21) ;

3 émaciation ;

4 baisse de libido par anoestrus ou atrophie testiculaire (21) ;

5 conjonctivite (87), suivie d'une kératite puis d'une pigmentation de la cornée (107) ;

6 diminution de la croissance par désordres osseux chez le jeune (43);

7 baisse de l'efficacité immunitaire provoquant des états de diarrhée, de lymphadénopathie, d'otite...

2. Syndrome d'intoxication

Le chien est l'animal le plus sensible à l'intoxication par le Zinc (97). Elle se traduit dans cette espèce par :

a des vomissements ;

b un état d'anorexie et de dépression (97) ;

c une lassitude intense ;

d des réflexes tendineux diminués (28) ;

e la dépression du système nerveux central pouvant conduire à des tremblements voire à une paralysie des extrémités ;

f une anémie hémolytique grave provoquant des lésions hépatiques (19) et rénales (97) ;

g diarrhée et selles blanchâtres.

II Matériel et Méthodes

Dans le cadre d'une clientèle à forte prédominance canine, nous avons pu exploiter rétrospectivement des résultats d'analyse de poils obtenus sur des chiens dont le statut médical était connu précisément au moment du prélèvement. Ces données ont été extraites du fichier établi par les Docteurs vétérinaires Moniot et Arvy sur la période 1997 – 2000.

Un lot de chiens sains a ensuite été prélevé afin de constituer, de manière prospective, un groupe de témoins.

Dans cette étude, nous utilisons une méthode standardisée d'échantillonnage, de traitement et d'analyse. Le biais lié à ces éléments est donc diminué au maximum.

A Les animaux

Le statut physiologique des chiens malades avait préalablement été défini sur la base de critères cliniques, et d'examens radiologiques, biochimiques et hématologiques. Leurs résultats avaient été comparés aux normes vétérinaires couramment admises.

Les profils pathologiques étudiés sont au nombre de 9 : l'épilepsie, la baisse de l'état général, les troubles articulaires, les troubles urinaires, les troubles cutanés, les inflammations ou infections chroniques, l'hypothyroïdie, les tumeurs, les troubles digestifs. Le nombre de chiens entrant dans chacune de ces catégories est détaillé dans le tableau VI.

Finalement, 113 chiens ont été retenus de façon rétrospective, au sein de 600 chiens ayant subi une analyse pilaire.

De façon prospective et aléatoire, nous avons constitué un groupe témoin de 57 chiens. Ces animaux, considérés comme sains par leur vétérinaire, ont été tirés au sort au sein d'une liste de chiens d'élevage. Les prélèvements ont eu lieu les 28 et 30 août 2000 dans la région bordelaise. La répartition de ces animaux en terme de sexe, de race, d'élevage, de couleur et d'alimentation est détaillée dans le tableau VII.

L'alimentation des chiens est dans tous les élevages prélevés à base de croquettes de fabrication industrielle. Chaque chien reçoit bien sûr la forme appropriée à son stade physiologique : croissance, gestation, allaitement, adulte, adulte castré... Ces croquettes sont le plus souvent complètement adaptées aux besoins du chien.

TABLEAU VI : Répartition des 113 chiens au sein des 9 catégories de maladies

Différentes maladies, critères de définition et nombre de chien y répondant au sein de l'étude.

Maladies	Nombre d'animaux	Critères de sélection
Epilepsie	25	Convulsions
Baisse de l'état général	5	Fatigabilité, Faiblesse générale
Troubles articulaires	11	Clinique : Difficultés locomotrices, Douleur à la manipulation
Troubles urinaires	9	Clinique : hématurie, strangurie, dysurie... Echographique : Urolithiases
Troubles cutanés	35	Erythème, Prurit, Squamosis, Alopecie...
Inflammation et infection chroniques	9	Signes d'inflammation divers et fréquents, surinfections fréquentes
Hypothyroïdie	6	Clinique : Fatigabilité, Désintérêt, Diminution du volume testiculaire Hématologique : Hypercholestérolémie
Tumeurs	10	Masse tissulaire de localisations diverses
Troubles digestifs	3	Vomissements, Diarrhées, Borborygmes...

TABLEAU VII : Répartition des 57 chiens sains

Race		Sexe		Alimentation		Elevage		Couleur	
Berger Allemand	8	Mâle	1	Pedigree Pal		Marylou	8		
		Femelle	7	Royal Canin	8				
Bobtail	1	Mâle		Pedigree Pal		Terrien	1		
		Femelle	1	Royal Canin	1				
Caniche	24	Mâle	11	Pedigree Pal	24	Lefevre	24	Noire	11
		Femelle	13	Royal Canin				Blanche	8
								Abricot	3
								Marron	2
Cavalier King Charles	4	Mâle	1	Pedigree Pal		Terrien	4		
		Femelle	3	Royal Canin	4				
Cocker américain	12	Mâle	5	Pedigree Pal		Hébert	8		
		Femelle	7	Royal Canin	12	Terrien	4		
Coton de Tuléar	3	Mâle	2	Pedigree Pal		Terrien	3		
		Femelle	1	Royal Canin	3				
Lhasa apso	3	Mâle	2	Pedigree Pal		Terrien	3		
		Femelle	1	Royal Canin	3				
Rottweiller	2	Mâle	1	Pedigree Pal		Hébert	2		
		Femelle	1	Royal Canin	2				
Total		Mâle	20	Pedigree Pal	24	Marylou	8		
		Femelle	37	Royal Canin	33	Terrien	15		
						Lefevre	24		
						Hébert	10		

B Prélèvement et analyse des poils

Les poils ont été prélevés par tonte au niveau des gouttières jugulaires ou du sternum (région non souillée). Chaque échantillon a été placé indépendamment dans une enveloppe vierge avant d'être envoyé par voie postale au laboratoire SEROM. Les résultats nous parviennent sur papier (exemple annexe IV).

C Analyse des données

Une fois le tableau de données saisi, nous nous sommes posé plusieurs questions, certaines concernant les données établies sur les chiens sains, les autres sur les résultats obtenus de chiens malades.

1. Animaux sains

Dans le cadre des animaux sains, existe-t-il une influence de facteurs tels que le sexe, l'élevage, l'alimentation, la couleur du poil ou la race ?

Pour tester l'effet de ces paramètres et leur importance, nous avons utilisé la méthode d'analyse de variance générale à deux facteurs. Le matériel informatique choisi est la procédure GLM au sein du système SAS.

La procédure GLM réalise des analyses de la variance à partir des données issues d'une grande variété de plans expérimentaux déséquilibrés. Avec ce matériel d'analyse, les variables sont testées deux à deux systématiquement. Cela permet de diminuer le taux d'erreur, de rendre les résultats plus précis. C'est pourquoi le support expérimental est dit déséquilibré, le nombre de chiens mâles étant différent du nombre de femelles, lui-même différant du nombre de Bergers Allemands...

Nous avons testé successivement le lot et le sexe, la race et le sexe, la couleur et le sexe, l'alimentation et le sexe. Les autres couples de variables ont été évités car elles ne sont pas toutes indépendantes deux à deux. En effet, certaines races ne sont présentes que dans un lot, donc le test simultané lot et race provoquerait un biais d'analyse. De même, l'alimentation est directement liée à l'élevage d'origine, le test alimentation et lot n'a donc pas été effectué. Enfin, la couleur ne concerne que les caniches, qui proviennent tous du même lot...Le sexe est le seul élément qui soit totalement aléatoire, et pour lequel le biais est minimum.

Mais, lorsque 2 paramètres sont testés simultanément, il peut y avoir interférence. En effet, les effectifs sont déséquilibrés au sein d'un élevage et au sein d'une race, puisqu'il y a 4 élevages et 7 races...Pour chaque paramètre de variation (sexe, lot, alimentation, race, couleur), le nombre de variables est différent (2 sexes, 4 lots, 2 alimentations, 7 races, 3 couleurs). Le système SAS propose alors le calcul de la moyenne ajustée des autres termes du modèle. Sa valeur tient compte des différences d'effectif entre les variables.

2. Animaux malades

En ce qui concerne les résultats des chiens malades, bien d'autres problèmes se sont posés. Globalement, les animaux malades offrent-ils des résultats d'analyse pilairé significativement différents de ceux des chiens sains ? Les maladies se distinguent-elles les unes des autres sur le support pilairé ? Certaines maladies sont-elles caractérisées par une variation nette systématique en un ou plusieurs oligo-éléments par rapport aux chiens sains ? Existe-t-il au contraire des oligo-éléments dont la concentration pilairé n'a aucune signification physiologique ? Enfin, à partir de son profil pilairé, peut-on connaître la maladie d'un chien ?

En première approche, nous voulions une étude globale de tous les éléments pour les 9 maladies ainsi que pour les animaux sains (dixième groupe). C'est pourquoi une analyse factorielle discriminante a été réalisée. Ce matériel d'étude statistique est bien adapté au tri et à la description globale de nombreuses variables quantitatives. Le principe est la recherche de combinaisons linéaires permettant de classer tous nos groupes de données, comme dans un espace à plusieurs axes. (Annexe V) Chaque groupe pourra être différencié au moins sur l'un des axes. Le choix du nombre d'axes, ici 5, est directement lié au nombre de groupes et de variables traités.

Le test de Fischer est utilisé ensuite pour comparer nos variables. Il va nous permettre de dire quels oligo-éléments participent le plus aux variations inter-maladies.

Au cas où les résultats de cette première étude se révéleraient positifs, c'est à dire que la différence entre deux groupes de malades est significative, nous pouvons aller plus loin, pour rechercher de façon plus précise les éléments en cause. Par exemple, si on découvre que les résultats pilaires des chiens épileptiques sont significativement différents de ceux des chiens sains, on peut se demander quels oligo-éléments sont en cause, et avec quelle importance ils diffèrent les uns des autres. Pour obtenir ces informations plus poussées, nous utilisons la procédure GLM du système SAS, comme dans le premier paragraphe. C'est une méthode d'analyse de variance entièrement informatisée et très simple d'utilisation.

III Résultats

A Animaux sains

Nos résultats sont présentés sous forme de normes, en distinguant moyennes, écart types et intervalles de confiance, calculés systématiquement pour tous les éléments. L'influence des facteurs environnementaux et individuels a aussi été testée sur tous les minéraux, indépendamment les uns des autres.

1. Normes de résultats

a) Moyennes

Le tableau VIII rassemble les moyennes et les écart types mesurés pour chaque élément dans notre lot de 57 chiens sains.

La concentration pilair la plus importante, de loin, est celle en Calcium avec une moyenne de 1529 µg.

Quatre autres minéraux sont concentrés dans le poil :

le Fer avec une moyenne de 241 µg par gramme de poil,
le Magnésium avec 130 µg en moyenne,
le Zinc avec 187 µg,
l'Aluminium à 177 µg.

Le Cuivre (20,5 µg), le Manganèse (27,4 µg) et le Plomb (7,2 µg) présentent des concentrations moyennes dans le poil.

Enfin, 6 oligo-éléments sont en quantité minime dans le poil, à moins de 5 µg par gramme de poil. Ce sont :

- le Cadmium (0,6 µg),
- le Chrome (1,16 µg),
- le Cobalt (2,6 µg),
- le Mercure (4,05 µg),
- le Nickel (3,67 µg)
- et le Sélénium (0,91 µg).

b) Ecart types

Il est intéressant de comparer l'écart type à la moyenne correspondante. Un écart type relativement faible signe un résultat beaucoup plus fiable.

Tableau VIII : Résultats obtenus sur les 57 chiens sains

Élément	Moyenne	Ec
---------	---------	----

Les résultats de concentrations pilaires minérales sont, du moins fiable au plus fiable, ceux :

- du Manganèse (un écart type correspondant à 212% de la moyenne montre que la teneur pilaire en cet élément est extrêmement variable dans la population canine),
- du Fer (87%),
- de l'Aluminium (79%),
- du Magnésium (76%),
- du Calcium (71 %),
- du Cadmium (68%),
- du Chrome (60%),
- du Plomb (53%),
- du Cuivre (45%),
- du Zinc (35%),
- du Cobalt (25%),
- du Nickel (21%),
- du Mercure (15%)
- et du Sélénium (son écart type de 8% par rapport à la moyenne signe une variabilité faible de cette concentration pilaire entre les chiens).

c) Intervalles de confiance

Les intervalles de confiance calculés sur les résultats de notre expérimentation sont rapportés dans le tableau IX. La comparaison aux normes utilisées par le laboratoire SEROM donne les résultats suivants.

Les intervalles calculés avec nos résultats entrent dans l'intervalle de référence pour les éléments suivants :

- le Cadmium : [0,48 – 0,71] est inclus dans [0 - 2],
- le Cobalt : [2,41 – 2,78] est inclus dans [1,5 – 3,5],
- le Cuivre : [17,9 – 23,1] est inclus dans [12 - 28],
- le Magnésium : [102 - 158] est inclus dans [35 - 200],
- le Mercure : [3,89 – 4,22] est inclus dans [0 - 10],
- le Nickel : [3,46 – 3,88] est inclus dans [3 - 9],
- le Plomb : [6,13 – 8,27] est inclus dans [0 - 30],
- le Sélénium : [0,89 – 0,93] est inclus dans [0 - 1],
- et le Zinc : [169 - 205] est quasiment inclus dans [170 - 330].

Par contre les trois éléments suivants présentent des intervalles de confiance calculés bien supérieurs à ceux utilisés par le laboratoire :

- o l'Aluminium : [138 - 215] très au-dessus de [0 - 50],
- o le Fer : [183 - 300] bien au-dessus de [7 - 120],
- o le Manganèse : [11,1 – 43,6] bien au-dessus de [3 - 7].

Tableau IX : Comparaison entre les intervalles de confiance de concentration pilaire obtenus sur nos chiens sains, sur nos chiens malades et ceux utilisés par le laboratoire SEROM.

Elément	Intervalle de confiance calculé pour la population des chiens sains	Intervalle de confiance calculé pour la population des chiens malades	Intervalle de normalité utilisé par le laboratoire SEROM
Aluminium	138 – 215	52,3 – 78,4	0 – 50
Cadmium	0,48 – 0,71	0,6 – 0,9	0 – 2
Calcium	1125 – 1733	927 - 1603	500 – 1500
Chrome	0,97 – 1,36	0,64 – 0,95	1 – 3
Cobalt	2,41 – 2,78	1,07 – 1,41	1,5 – 3,5
Cuivre	17,9 – 23,1	7,4 – 21,7	12 – 28
Fer	183 – 300	73,2 – 106,8	7 – 120
Magnésium	102 – 158	100 - 207	35 – 200
Manganèse	11,1 – 43,6	3,79 – 8,26	3 – 7
Mercure	3,89 – 4,22	0 – 2,62	0 – 10
Nickel	3,46 – 3,88	2,41 – 3,29	3 – 9
Plomb	6,13 – 8,27	14 – 22,3	0 – 30
Sélénium	0,89 – 0,93	0,45 – 0,64	0 – 1
Zinc	169 - 205	150 - 172	170 – 330

L'intervalle calculé pour les concentrations pilaires en Calcium [1125 - 1733] a tendance à être supérieur à la référence [500 - 1500]. C'est le contraire pour le Chrome qui est plutôt inférieur dans les résultats de notre étude [0,97 – 1,36] par rapport aux normes admises [1 - 3].

2. Facteurs de variation

a) Sexe

Le paramètre sexe n'a aucun impact sur les résultats. Le groupe des mâles et celui des femelles ne présentent entre eux aucune concentration minérale pilaire statistiquement différente. Tableau X.

b) Couleur

Le facteur couleur, concernant uniquement les caniches, joue un rôle dans les concentrations pilaires de Calcium, Magnésium, Cuivre, Manganèse *et* aluminium. Les variations concernant le Calcium et le Magnésium sont les plus marquées avec une fiabilité maximum ($p < 0,0001$). Tableau XI.

c) Lot

L'importance de l'élevage d'origine sur les teneurs pilaires se note sur 8 des 14 oligo-éléments. Ce sont le Zinc, le Cobalt, le Magnésium, le Calcium, et à plus forte raison le Manganèse, le Fer, le Chrome et l'Aluminium. Ces quatre derniers éléments sont modifiés d'un lot à un autre de façon très nette, avec une significativité marquée ($p < 0,0001$). Tableau XII.

d) Alimentation

L'alimentation a une influence sur les concentrations pilaires en Fer, Chrome, Aluminium et Cuivre. L'impact le plus fort étant notable sur la teneur en Chrome ($p < 0,01$). Tableau XIII.

e) Race

Enfin, l'effet race est très important. Les concentrations pilaires sont globalement significativement différentes entre les races sauf celles du Plomb et du Cadmium.

Etant donné le nombre de races représentées dans notre étude, et l'importance de ce sujet, nous avons approfondi les recherches race par race. Pour cela, nous avons mesuré les moyennes ajustées, afin de connaître les races concernées par des variations nettes en tel ou tel autre oligo-élément. (tableau XIV)

Tableau X : Moyennes de concentration pilaire en fonction du sexe du chien.

Sur la même ligne, deux moyennes ayant une lettre identique en exposant ne sont pas significativement différentes.

Elément	Sexe Mâle	Sexe Femelle
Aluminium	198 ^a	184 ^a
Cadmium	0,71 ^a	0,54 ^a
Calcium	1510 ^a	1486 ^a
Chrome	1,26 ^a	1,18 ^a
Cobalt	2,59 ^a	2,58 ^a
Cuivre	22,1 ^a	20,5 ^a
Fer	393 ^a	236 ^a
Magnésium	139 ^a	127 ^a
Manganèse	32,0 ^a	21,5 ^a
Mercure	3,96 ^a	4,09 ^a
Nickel	3,69 ^a	3,66 ^a
Plomb	8,31 ^a	6,84 ^a
Sélénium	0,89 ^a	0,92 ^a
Zinc	206 ^a	172 ^a

Tableau XI : Moyennes de concentrations pilaires des caniches en fonction de la couleur de leurs poils.

Sur la même ligne, deux moyennes n'ayant aucune lettre identique en exposant sont significativement distinctes.

Elément	Couleur Abricot	Couleur Blanche	Couleur Marron	Couleur Noire
Aluminium	313 ^{ab}	192 ^a	305 ^{ab}	304 ^b
Cadmium	1,03 ^a	0,47 ^b	0,45 ^{ab}	0,69 ^{ab}
Calcium	1505 ^a	732 ^{ab}	1747 ^{ac}	2827 ^d
Chrome	1,64 ^{ab}	1,20 ^a	1,49 ^{ab}	1,84 ^b
Cobalt	2,79 ^a	2,46 ^a	1,95 ^a	2,50 ^a
Cuivre	21,1 ^{ab}	19,4 ^a	25,2 ^{ab}	30,4 ^b
Fer	419 ^a	265 ^a	399 ^a	431 ^a
Magnésium	82,8 ^a	46,5 ^a	105 ^a	207 ^b
Manganèse	11,7 ^{ab}	6,38 ^a	12,5 ^{ab}	16,5 ^b
Mercure	4,19 ^a	3,96 ^a	3,24 ^a	3,83 ^a
Nickel	3,94 ^a	3,63 ^a	3,03 ^a	3,72 ^a
Plomb	10,2 ^a	7,83 ^a	9,58 ^a	8,74 ^a
Sélénium	0,91 ^a	0,93 ^a	0,85 ^a	0,88 ^a
Zinc	176 ^a	172 ^a	162 ^a	185 ^a

**Tableau XII :Moyennes de concentrations pilaires selon l'élevage
d'origine du chien**

Sur la même ligne, deux moyennes n'ayant aucune lettre commune en exposant sont significativement différentes.

Elément	Eleveur Lefevre	Eleveuse Marylou	Eleveuse Hébert	Eleveur Terrien
Aluminium	50,6 ^a	54,7 ^a	268 ^b	267 ^b
Cadmium	0,43 ^a	0,57 ^{ab}	0,93 ^b	0,64 ^{ab}
Calcium	730 ^a	448 ^a	2331 ^b	1867 ^b
Chrome	0,56 ^a	0,52 ^a	1,62 ^b	1,58 ^b
Cobalt	2,34 ^a	2,37 ^a	3,54 ^b	2,48 ^a
Cuivre	15,3 ^a	14,9 ^a	23,0 ^b	25,1 ^b
Fer	48,7 ^a	86,4 ^a	397 ^b	371 ^b
Magnésium	110 ^{ac}	44,1 ^a	252 ^b	129 ^c
Manganèse	1,75 ^a	6,94 ^a	134 ^b	12,4 ^a
Mercure	3,99 ^{ab}	4,42 ^a	4,31 ^{ab}	3,87 ^b
Nickel	3,41 ^a	3,47 ^a	4,29 ^b	3,67 ^a
Plomb	7,38 ^{ab}	5,03 ^a	5,84 ^a	8,75 ^b
Sélénium	0,89 ^a	0,93 ^{ab}	0,95 ^b	0,90 ^{ab}
Zinc	241 ^a	140 ^b	177 ^b	179 ^b

Tableau XIII : Moyennes pilaires en fonction de l'alimentation du chien

Deux moyennes de la même ligne ayant deux lettres distinctes en exposant sont significativement différentes.

Élément	Aliment Pedigree pal	Aliment Royal Canin
Aluminium	267 ^a	114 ^b p<0,0001
Cadmium	0,64 ^a	0,61 ^a
Calcium	1872 ^a	1124 ^b p<0,05
Chrome	1,58 ^a	0,86 ^b p<0,0001
Cobalt	2,48 ^a	2,69 ^a
Cuivre	25,1 ^a	17,4 ^b p<0,005
Fer	372 ^a	157 ^b p<0,0001
Magnésium	130 ^a	136 ^a
Manganèse	12,6 ^a	40,9 ^a
Mercure	3,87 ^a	4,18 ^a
Nickel	3,67 ^a	3,68 ^a
Plomb	8,76 ^a	6,39 ^b p<0,05
Sélénium	0,90 ^a	0,92 ^a
Zinc	179 ^a	198 ^a

(1) Aluminium

Pour cet élément, la moyenne obtenue est de 177 µg par gramme de poil. Son écart type est de 139 µg. Sa valeur maximale de 215 µg, contre une valeur minimale de 138 µg.

Les Cockers (221 µg) et les Caniches (267 µg) présentent ensemble des teneurs en Aluminium significativement supérieures à celles des autres races, sauf le Rottweiller (148 µg).

(2) Cadmium

Le Cadmium pilair montre une moyenne de 0,6 µg dans notre étude, avec un écart type de 0,41 µg. Son intervalle de confiance est [0,48 – 0,71].

Les concentrations pilaires en Cadmium ne montrent pas de disparités nettes entre races. Nous pouvons seulement noter une tendance à des teneurs supérieures chez le Cocker (0,77 µg) et inférieures chez le Coton de Tuléar (0,18 µg). Ceci est d'ailleurs cohérent avec les observations faites sur ces deux races pour les autres oligo-éléments.

(3) Calcium

Les résultats analytiques apportent une moyenne de 1429 µg, un écart type de 1085 µg, un seuil minimal de 1125 µg et un seuil maximal de 1733 µg.

Le Rottweiller (2628 µg) présente une concentration en Calcium très supérieure à celles du Berger Allemand (432 µg), du Cavalier (391 µg), du Bobtail (157 µg), du Cocker (1698 µg) et du Coton de Tuléar (563 µg).

(4) Chrome

Nos calculs donnent une moyenne en Chrome pilair de 1,16 µg pour 1 gramme de poils, un écart type de 0,69 µg. L'intervalle de confiance de cet élément est [0,97 – 1,36].

Les concentrations pilaires en Chrome du Caniche (1,58 µg) et du Cocker Américain (1,41 µg) se distinguent. Elles sont supérieures à celles des autres races, sauf les Rottweillers (0,95 µg).

(5) Cobalt

Les tableaux précédents présentent une moyenne de 2,6 µg et un écart type de 0,65 µg pour cet élément. Son intervalle de confiance est [2,41 – 2,78].

La teneur pilair en Cobalt met en évidence le Cocker Américain et le Coton de Tuléar. Le Cocker (3,23 µg) montre une concentration plutôt supérieure à celle de tous les chiens d'autres races. Le Coton (1,5 µg), au contraire, possède une concentration pilair en Cobalt inférieure à celle de toutes les races représentées sauf les Bobtails (2,58 µg) et les Lhasa Apso (2,29 µg).

(6) Cuivre

Le tableau VIII rapporte une moyenne pilair en cet élément de 20,5 µg par gramme de poil, associée à un écart type de 9,15 µg. L'intervalle de confiance de ce minéral est, d'après le tableau IX [17,9 – 23,1].

En ce qui concerne la concentration pilair en Cuivre, la différence est moins nette. Mais ce sont toujours le Caniche (25,1 µg) et le Cocker Américain (22,6 µg) qui montrent une valeur supérieure, ceci par rapport au Coton (10,8 µg) et au Rottweiller (11,5 µg), ainsi qu'au Berger Allemand (14,9 µg)(pour le Caniche seulement).

(7) Fer

La moyenne de concentration pilair pour cet élément est de 241 µg pour 1 gramme de poil. L'écart type est 209 µg, l'intervalle de confiance [183 – 300].

La race qui se distingue des autres dans le cas du Fer est le Caniche (371 µg). Sa concentration pilair en cet élément est en effet significativement supérieure à celle de toutes les races représentées sauf le Cocker (292 µg), le Bobtail (49,4 µg) et le Rottweiller (140 µg).

(8) Magnésium

Les calculs sur nos résultats analytiques concernant ce macro-élément apportent les éléments suivant :
* moyenne de 130 µg,
* écart type de 99,4 µg,
* intervalle de confiance [102 – 158].

Pour l'élément Magnésium, c'est la race Rottweiller (297 µg) qui sort du rang avec une concentration pilair bien supérieure à celle de tous les autres groupes, sauf le Lhasa Apso (174 µg) et le Cocker (190 µg). Quant au Berger Allemand (42,6 µg), il présente une teneur inférieure au Lhasa, au Caniche (129 µg) et au Cocker, en plus du Rottweiller.

Tableau XIV : Moyennes de concentration pilaire de 57 chiens en fonction de leur race.

Dans la même colonne, deux valeurs n'ayant aucune lettre identique sont significativement distinctes.

Race	Aluminium	Cadmium	Calcium	Chrome	Cobalt	Cuivre	Fer	Magnésium	Manganèse	Mercure	Nickel	Plomb	Sélénium	Zinc
Berger Allemand	55,5 a	0,59 ab	432 a	0,51 a	2,41 ab	14,9 a	87,5 a	42,6 a	7,71 a	4,45 a	3,52 a	5,05 a	0,93 a	138 a
Rottweiller	148 abc	0,45 ab	2628 d	0,95 abc	2,90 abc	11,5 ac	140 abc	297 d	53,8 ab	4,49 ab	3,71 ab	5,22 ab	0,94 a	156 ^{ac}
Bobtail	20,0 ac	1,04 ab	157 ab	0,43 ac	2,58 abcd	12,5 abc	49,4 abc	21,5 abc	4,32 abcd	4,09 ab	3,66 abcd	5,67 ab	0,90 a	166 abcd
Caniche	267 b	0,64 ab	1865 bd	1,58 b	2,48 b	25,1 b	371 b	129 bc	12,47 a	3,87 b	3,67 a	8,75 bc	0,90 a	178 c
Cocker Américain	221 bc	0,77 a	1698 bc	1,41 bc	3,23 c	22,6 bc	292 bc	190 cd	92,6 b	4,25 a	4,16 b	5,74 a	0,94 a	179 ac
Coton de Tuléar	17,6 a	0,18 b	563 ac	0,39 a	1,50 d	10,8 a	26,2 a	82,9 abc	0,02 a	2,85 c	2,21 c	4,87 ac	0,76 b	207 cd
Cavalier King Charles	22,2 a	0,55 ab	391 a	0,60 a	2,72 ab	15,0 ac	53,5 a	65,4 ab	3,11 a	4,43 a	4,06 ab	8,52 ab	0,94 a	261 bd
Lhasa Apso	46,3 a	0,42 ab	1154 abcd	0,55 a	2,29 bd	18,4 abc	93,5 ac	174 bcd	1,52 a	4,08 ab	3,23 ac	11,1 b	0,93 a	358 e

(9) Manganèse

La moyenne de concentration pilair calculée est de 27,4 µg, son écart type de 58 µg, son intervalle de confiance [11,1 – 43,6].

La concentration pilair en *Manganèse* du Cocker Américain (92,6 µg) est nettement supérieure à celle présentée par toutes les autres races sauf le Rottweiler (53,8 µg).

(10) Mercure

Les mesures de notre étude rapportent une moyenne de concentrations pilair de 4,05 µg, avec un écart type de 0,59 µg et un intervalle de confiance entre 3,89 et 4,22 µg de Mercure par gramme de poil.

Le Coton de Tuléar (2,85 µg) se distingue de toutes les autres races de chiens représentées par une teneur pilair en Mercure nettement inférieure.

(11) Nickel

Les concentrations pilaires en Nickel de notre étude donnent :

- une moyenne de 3,67 µg,
- un écart type de 0,78 µg,
- un intervalle de confiance de [3,46 – 3,88].

En ce qui concerne le Nickel, le Cocker (4,16 µg) se distingue de quelques autres races (Caniche, Coton, Lhasa et Berger allemand). Mais c'est surtout le Coton de Tuléar (2,21 µg) qui montre une concentration pilair nettement inférieure à celle des autres races, sauf celles du Lhasa Apso (3,23 µg) et du Bobtail (3,66 µg).

(12) Plomb

La moyenne pilair calculée est de 7,2 µg, l'écart type de 3,82 µg. L'intervalle de confiance qui en découle est [6,13 – 8,27].

L'étude de la concentration moyenne en Plomb montre quelques différences inter-races. Le Lhasa Apso (11,1 µg) et le Caniche (8,75 µg) présentent tous deux des teneurs supérieures à celles du Berger Allemand (5,05 µg) et du Cocker (5,74 µg). Le Lhasa présente en plus une valeur significativement supérieure à celle du Coton de Tuléar (4,87 µg).

(13) Sélénium

Notre étude rapporte une moyenne de concentration pilaire de 0,91 µg, un écart type de 0,07 µg et un intervalle de confiance des résultats de [0,89 – 0,93].

Comme pour beaucoup d'autres minéraux, le Coton de Tuléar (0,76 µg) présente une moyenne ajustée en Sélénium nettement inférieure à celle de toutes les autres races.

(14) Zinc

Nos résultats relativement à cet oligo-élément sont :

- o une moyenne de 187 µg par gramme de poil,
- o un écart type de 66 µg,
- o un intervalle de confiance des résultats entre 169 et 205 µg.

La moyenne de teneur pilaire en Zinc est très différente entre les races. Les deux qui se distinguent sont le Berger Allemand (138 µg), qui montre une teneur pilaire inférieure, et le Lhasa Apso (358 µg), qui présente une concentration bien supérieure. Cette deuxième race est statistiquement distincte de toutes les autres.

(15) Conclusion

Nous pouvons conclure provisoirement à l'existence de spécificités relatives aux races, comparativement aux moyennes globales des chiens sains (tableau VIII).

1 Le Cavalier King Charles possède un poil un peu plus riche en Plomb (8,52 µg) et en Cobalt (2,72 µg). Les moyennes globales étant respectivement 7,2 µg et 2,6 µg.

2 Le Lhasa Apso présente des teneurs pilaires en Plomb (11,1 µg) et en Zinc (358 µg) supérieures à celles des autres races (en moyenne 7,2 µg et 187 µg).

3 Le Berger Allemand a un poil moins riche en Magnésium (42,6 µg) et en Zinc (138 µg). La moyenne des chiens sains est respectivement pour ces deux éléments de 130 µg et 187 µg.

4 Le Rottweiler possède des concentrations pilaires en Magnésium (297 µg) et en Calcium (2628 µg) plus importantes que la moyenne (130 µg et 1429 µg).

5 Le Coton de Tuléar a un poil plus pauvre que celui des autres, ceci pour :

- o le Cobalt (1,5 µg contre une moyenne générale de 2,6 µg),
- o le Nickel (2,21 µg contre 3,67 en moyenne),
- o le Mercure (2,85 µg inférieure à la moyenne des sains de 4,05 µg)
- o et le Sélénium (0,76 µg contre 0,91 µg).

6 Le Caniche possède au contraire un poil plus riche en 4 oligo-éléments :

- o l'Aluminium (267 µg pour le caniche, 177 µg globalement),
- o le Chrome (1,58 µg contre 1,16 µg de moyenne chez le chien sain),
- o le Cuivre (25,1 µg plus élevé que la moyenne générale de 20,5 µg),
- o le Fer (371 µg dans cette race, 241 µg dans l'ensemble des races).

7 Enfin, le Cocker Américain présente des concentrations pilaires supérieures :

- en Cobalt (3,23 µg supérieur à 2,6 µg de moyenne),
- en Nickel (4,16 µg dans cette race contre 3,67 pour toutes les races confondues),
- en Manganèse (92,6 µg ici contre 27,4 globalement),
- en Chrome (moyenne de concentration pilaire de 1,41 µg chez le Cocker supérieure à la moyenne générale de 1,16 µg),
- en Aluminium (221 µg supérieure à la moyenne de 177 µg mesurée sur tous les chiens sains)
- et en Cuivre (22,6 µg contre 20,5 µg de moyenne).

8 Il est à noter que le Bobtail n'est représenté dans notre étude que par un individu. Sa concentration pilaire seule n'est que difficilement représentative de sa race. C'est pourquoi il ne se distingue jamais clairement des autres races prélevées. Son étude n'apporte que peu de renseignements.

B Animaux malades

113 chiens malades, atteint de 9 catégories différentes de maladies, ont subi des analyses pilaires minérales. Les résultats ont été traités avec deux outils statistiques : une analyse factorielle discriminante puis une analyse de variance, plus spécifique.

1. Analyse factorielle discriminante

L'analyse factorielle discriminante a été la première étude statistique mise en œuvre. Elle nous a permis d'obtenir :

- moyennes et d'écart types (avec lesquels nous avons calculé les intervalles de confiance),
- des corrélations globales entre oligo-éléments,
- des études de variabilité pour chaque élément,
- une répartition des chiens par rapport aux groupes pathologiques.

a) Moyennes

Des mesures statistiques élémentaires nous ont donné, pour chaque élément, les moyennes de concentration pilaire. (tableau XV)

Comme dans la population saine, trois minéraux (dont les deux macro-éléments) se distinguent par une concentration très importante dans les poils de chiens malades. Ce sont :

- le Calcium avec une moyenne de concentration pilaire de 1265 µg par gramme de poil,
- le Zinc avec une moyenne de 161 µg dans 1 gramme de poil,
- le Magnésium, présent en moyenne à 153 µg dans 1 gramme de poil.

Cinq oligo-éléments sont aussi concentrés dans 1 gramme de poil chez le chien malade avec des moyennes de concentrations pilaires :

- o pour le Fer à 90 µg,
- o pour l'Aluminium à 65,4 µg,
- o pour le Plomb à 18,2 µg,
- o pour le Cuivre à 14,6 µg,
- o puis pour le Manganèse à 6,03 µg.

Enfin, les six derniers minéraux ont une concentration moyenne dans les poils inférieure à 5 µg pour un gramme :

- le Nickel a une concentration de 2,85 µg,
- le Mercure de 1,27 µg,
- le Cobalt de 1,24 µg,
- le Chrome de 0,8 µg,
- le Cadmium de 0,74 µg,
- enfin le Sélénium montre la concentration pilaire la plus faible avec 0,55 µg en moyenne chez le chien malade.

b) Ecart types

Les écart types obtenus par cette étude sur 113 chiens malades sont le plus souvent très importants. Ils sont pour la majeure partie plus larges que la moyenne elle-même. Cela traduit une grande variabilité de la concentration en l'élément correspondant dans le lot testé :

- le Manganèse présente un écart type de 11,9 pour une moyenne de 6,03 µg (soit une variabilité de 197 % par rapport à la moyenne),
- le Magnésium a un écart type de 283 autour d'une moyenne de 153 µg (variabilité de 185 %),
- le Calcium donne un écart type de 1799 pour une moyenne à 1265 µg (variabilité de 142 % de la valeur de la moyenne dans le lot des chiens malades),
- les concentrations pilaires en Mercure ont une moyenne de 1,27 µg pour un écart type de 1,71 µg, soit 135 % de la moyenne,

Tableau XV : Résultats obtenus sur les 113 chiens malades

Elément	Moyenne	Ecart type
Aluminium	65,4	69,5
Cadmium	0,74	0,77
Calcium	1265	1799
Chrome	0,80	0,83
Cobalt	1,24	0,89
Cuivre	14,6	7,16
Fer	90	89,4
Magnésium	153	283
Manganèse	6,03	11,9
Mercure	1,27	1,71
Nickel	2,85	2,36
Plomb	18,2	22
Sélénium	0,55	0,50
Zinc	161	61

- le Plomb présente aussi un écart type important par rapport à sa moyenne pileire : 22 soit 121% de la valeur moyenne,
- l'Aluminium pileire a un écart type chez les chiens malades quasiment égal à sa concentration moyenne (soit 69,5 µg),
- enfin, le Cadmium (0,77) et le Chrome (0,83) présentent tous deux un écart type égal à 104 % de leurs moyennes respectives.

D'autres oligo-éléments présentent un écart type de leur concentration pileire important mais moins large que la valeur de leur moyenne :

- la variabilité reste importante pour l'élément Fer qui montre un écart type de 89,4 soit 99 % de sa moyenne,
- le Sélénium présente un écart type de 0,5 (91 % par rapport à sa moyenne pileire), sa concentration dans le poil est très variable d'un chien malade à un autre,
- les concentrations pileires en Nickel permettent le calcul d'un écart type de 2,36 µg, soit 83 % de la moyenne correspondante,
- le Cobalt présente une variabilité dans les poils de chiens malades de 72 % (écart type de 0,89),
- le Cuivre dans les poils a un écart type chez les chiens malades de 7,16 (49 % de sa concentration pileire moyenne),
- enfin, le Zinc est l'élément dont la concentration est la plus fiable dans les poils de chiens malades. Son écart type de 61 ne représente que 38 % de la valeur de sa concentration pileire moyenne.

De façon générale, les concentrations pileires minérales sont extrêmement variables dans notre étude sur les chiens malades.

c) Intervalles de confiance

Les intervalles de confiance des résultats d'analyses pileires chez le chien ont été calculés dans le cadre de la population malade, comme précédemment dans la population saine (tableau IX). Ceci permet de comparer ces deux lots entre eux, mais aussi de valider les intervalles de référence utilisés en France.

(1) Comparaison chiens sains – chiens malades

Un des objectif de l'étude était la mise en évidence de concentrations pileires distinctes entre ces deux groupes de chiens. Pour cela, il faut que leurs intervalles de confiance ne se chevauchent pas.

Si les intervalles sont totalement distincts, alors une concentration pilaire seule permettra de classer le chien dans la catégorie malade ou saine.

Nos résultats (tableaux IX) mettent en évidence 9 éléments dont les intervalles de confiance sont totalement distincts entre le lot malade et le lot sain. Parmi eux, 8 présentent des valeurs inférieures chez les chiens malades. Seul le Plomb est en concentration distincte mais supérieure dans les poils de chiens malades par rapport aux chiens sains.

Les éléments dont l'intervalle de confiance des concentrations pilaires sur chiens malades est distinct et inférieur à celui des chiens sains sont les suivants :

- l'Aluminium : dans l'intervalle [52,3 – 78,4] chez les chiens malades, [138 – 215] chez les chiens sains ;
- l'intervalle du Chrome chez les chiens malades est [0,64 – 0,95], contre [0,97 – 1,36] chez les sains ;
- le Cobalt pilaire des malades est dans l'intervalle [1,07 – 1,41], celui des chiens sains dans l'espace [2,41 – 2,78] ;
- le Fer possède une concentration pilaire incluse dans l'intervalle [73,2 – 106,8] chez un chien malade, dans [183 – 300] chez un chien en bonne santé ;
- le Manganèse, dans l'intervalle [3,79 – 8,26] chez le chien malade, est plutôt dans l'intervalle [11,1 – 43,6] chez un chien sain ;
- le Mercure pilaire est entre 0 et 2,62 µg chez un chien malade, entre 3,89 et 4,22 µg chez un chien sain ;
- le Nickel se trouve dans l'intervalle [2,41 – 3,29] dans un poil de chien malade, dans l'intervalle [3,46 – 3,88] dans un poil de chien sain ;
- une concentration pilaire en Sélénium située entre 0,45 et 0,64 µg signe un état pathologique du chien d'origine ; alors que si elle se situe entre 0,89 et 0,93, elle traduit plutôt l'état de bonne santé de l'animal.

Quatre éléments donnent des intervalles de confiance qui s'entrecroisent entre les deux population. Un résultat de concentration pilaire en l'un de ces minéraux (même les quatre résultats) ne donne aucune indication quant à l'état sanitaire du chien d'origine.

Ce sont :
* le Cadmium
* le Calcium
* le Cuivre
* le Magnésium.

L'intervalle de confiance mesuré dans le lot pathologique est le plus souvent décalé vers le bas par rapport à celui des chiens sains. Les chiens malades présentent généralement des concentrations pilaires minérales plus basses.

Seul deux éléments font exception à la règle :

- le Cadmium dont la concentration pilaire chez les chien malades évolue dans l'intervalle [0,6 – 0,9], plutôt supérieur à l'intervalle [0,48 – 0,71] mesuré chez les chiens sains,
- le Plomb avec un intervalle de confiance de [14 – 22,3] chez les chiens malades contre des valeurs bien inférieures : [6,13 – 8,27] chez les chiens sains.

(2) Comparaison avec l'intervalle de référence

Les intervalles de normalité devraient, dans le meilleur des cas, se superposer à l'intervalle de confiance calculé sur les chiens sains tout en étant distincts des intervalles obtenus chez les chiens malades.

La normalité admise pour le Zinc, le Cobalt et le Chrome est cohérente avec notre étude. L'intervalle de confiance de nos chiens sains s'y trouve incluse, et pas celui de nos chiens malades.

Par contre, l'intervalle de normalité utilisé par le laboratoire ne contient aucun de nos intervalles calculés dans le cas de l'Aluminium.

Puis, les intervalles du Fer et du Manganèse pilaires n'incluent que nos résultats de chiens malades.

Enfin, les normes du Cadmium, du Calcium, du Cuivre, du Magnésium, du Mercure, du Nickel, du Plomb et du Sélénium contiennent à la fois les résultats normaux et pathologiques de notre étude...

Ces normes de laboratoire ne sont pas du tout cohérentes avec les résultats de notre étude. Pour être utilisables, elles devraient systématiquement inclure le résultat d'un chien sain et exclure celui d'un chien malade.

Le fait que les intervalles de confiance se chevauchent pour certains éléments comme le Cadmium, le Calcium, le Cuivre et le Magnésium explique bien sûr la raison pour laquelle l'intervalle de normalité ne peut inclure l'un sans l'autre.

d) Corrélations entre minéraux

Des corrélations globales entre oligo-éléments sont ici étudiées par rapport à leurs concentrations pilaires (tableau XVI).

Tableau XVI : Corrélations entre les oligo-éléments pilaires au sein du groupe de chiens malades versus celui des chiens sains.

Le nombre inscrit dans une case donnée est l'indice (au taux d'erreur de 1%) de corrélation entre l'élément de la ligne et l'élément de la colonne correspondantes. * signale un lien entre deux minéraux retrouvé dans le lot malade et qui n'existe pas dans le lot sain.

Eléments	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr	Al	Cu	Hg	Se	Pb	Cd	Mg	Ca
Zn											0.641			
Co			0.617	0.597		0.545			0.483					
Ni		<i>0.419</i>				0.411			0.554					
Mn					0.404	0.429							0.534	0.446
Fe				<i>0.446</i>		0.759	0.845	0.697						0.604
Cr		<i>0.422</i>					0.714	0.599						0.577
Al				<i>0.443</i> *	<i>0.923</i>			0.737						0.584
Cu					<i>0.359</i>		<i>0.343</i>							
Hg		<i>0.420</i>	<i>0.444</i>											
Se		<i>0.322</i> *	<i>0.462</i> *						<i>0.582</i> *					
Pb	<i>0.666</i>													
Cd		<i>0.715</i> *	<i>0.410</i> *			<i>0.263</i> *			<i>0.361</i> *	<i>0.366</i> *	<i>0.265</i> *			
Mg														0.849
Ca				<i>0.430</i>									<i>0.819</i>	

Le lien fort connu entre le Calcium et le Magnésium est retrouvé entre leurs concentrations pilaires chez les chiens sains comme chez les chiens malades. L'indice de corrélation entre leur teneur est important, puisque proche de un : 0,849 dans le lot sain et 0,819 dans le lot malade.

Certains liens entre minéraux pilaires sont modifiés lors d'affection. On découvre des corrélations chez les animaux malades qui n'existent pas dans le lot sain (*).

Par exemple, la concentration pilaire en Cadmium n'est corrélée à aucune autre chez les chiens sains. Par contre, dans le lot pathologique, le Cadmium possède une teneur pilaire liée à celle de 6 autres oligo-éléments :

- le Cobalt (avec un indice de 0,715),
- le Chrome (0,263),
- le Mercure (0,361),
- le Nickel (0,410),
- le Plomb (indice de 0,265),
- le Sélénium (0,366).

e) Variabilité pour chaque élément

Au sein de l'analyse factorielle, un test de Fischer nous permet de savoir quels éléments interviennent dans la variabilité pathologique. (tableau XVII)

Cinq éléments n'ont aucune importance dans la différenciation entre chiens malades et chiens sains, ni même entre différentes maladies (p reste très élevé). Leur mesure n'apporte aucun renseignement quant au statut physiologique du chien. Ce sont le Cadmium, le Calcium, le Chrome, le Magnésium et le Manganèse. Leurs concentrations pilaires sont trop hétérogènes, elles ne reflètent pas du tout l'état de santé de l'animal.

Il est à noter que l'on retrouve 3 des 4 minéraux dont les intervalles de confiance se chevauchent entre chiens sains et chiens malades (Cadmium, Calcium et Magnésium).

D'autres oligo-éléments prennent toute leur importance quand on les étudie au sein de la comparaison chiens sains-malades. Leur variabilité est peu importante entre les groupes de malades, et elle devient très significative lorsqu'on y ajoute le groupe témoin (p devient inférieur à 5%). Ce sont le Cobalt, le Nickel, l'Aluminium, le Cuivre, le Sélénium et le Plomb. La concentration pilaire en ces éléments pourrait intervenir dans la définition de l'état sanitaire du chien.

Enfin, le Fer et le Mercure prennent une significativité bien meilleure une fois que le groupe des chiens sains est pris en compte (p devient < 0,0001). Ces deux oligo-éléments permettront d'établir une différence plus fine entre malades et sains.

Tableau XVII : Importance de chacun des oligo-éléments dans la différence entre maladies.

Elément	Oligo-éléments importants dans la différence entre chiens sains et chiens malades	Oligo-éléments importants dans la différence entre maladies
Aluminium	Variabilité significative P<0,0001	Valeur non significative d'une maladie particulière
Cadmium	Valeur non significative d'un état physiologique	Valeur non significative d'une maladie particulière
Calcium	Valeur non significative d'un état physiologique	Valeur non significative d'une maladie particulière
Chrome	Valeur non significative d'un état physiologique	Valeur non significative d'une maladie particulière
Cobalt	Variabilité significative P<0,0001	Valeur non significative d'une maladie particulière
Cuivre	Variabilité significative P<0,001	Valeur non significative d'une maladie particulière
Fer	Variabilité significative P<0,0001	Variabilité significative P<0,05
Magnésium	Valeur non significative d'un état physiologique	Valeur non significative d'une maladie particulière
Manganèse	Valeur non significative d'un état physiologique	Valeur non significative d'une maladie particulière
Mercure	Variabilité significative P<0,0001	Variabilité significative P<0,05
Nickel	Variabilité significative P<0,05	Valeur non significative d'une maladie particulière
Plomb	Variabilité significative P<0,01	Valeur non significative d'une maladie particulière
Sélénium	Variabilité significative P<0,0001	Valeur non significative d'une maladie particulière
Zinc	Variabilité significative P<0,001	Variabilité significative P<0,05

f) Répartition des animaux au sein des groupes

Le tableau d'appartenance permet de classer tous les chiens prélevés dans la maladie qui correspond le mieux à leur résultat d'analyse. Il va nous permettre de mettre en évidence d'éventuels profils de concentrations pilaires caractéristiques d'une certaine maladie.

De nombreux chiens malades ont des concentrations pilaires qui pourraient être affectées à un chien ayant une maladie différente de la leur. Dans notre étude, aucun profil pilaire n'est strictement caractéristique d'une maladie plutôt que d'une autre. Seul le groupe des témoins présente des résultats relativement homogènes.

Finalement, l'analyse factorielle discriminante permet d'établir, sur un plan à cinq axes, des nuages de point correspondant à chacun des 10 lots. On remarque alors aisément que le groupe des témoins est le seul nuage bien distinct des autres. Les chiens sains présentent des résultats d'analyse pilaire différenciables de ceux d'un chien malade. (Annexe V)

Il existe une variation pilaire en fonction du statut physiologique. Mais, de façon plus particulière, quels éléments caractérisent-ils le mieux une maladie donnée ? Et leur concentration se trouve-t-elle augmentée ou diminuée ?

2. Analyse de variance

Pour répondre à ces questions plus précises, nous nous appuyons sur une analyse de variance avec la procédure GLM. Nous obtenons les moyennes ajustées pour chaque oligo-élément au sein d'un groupe donné. Puis, la comparaison entre ces moyennes nous indique si la différence est significative ou non d'un groupe à l'autre.

Si la variation est statistiquement valable, c'est que sa valeur de p est inférieure à 0,05. Plus cette valeur est petite, plus le résultat est fiable. Si $p < 0,0001$, alors la différence est non seulement certaine mais elle est en plus importante quantitativement.

Seuls les éléments dont la variabilité avait été trouvée significative par l'étude globale discriminante (tableau XVII) seront traités ici. L'ensemble des résultats est retranscrit dans le tableau XVIII.

Afin d'avoir un support de comparaison, la moyenne et l'écart type calculés sur l'ensemble des chiens est rappelé pour chaque élément.

a) Aluminium

La moyenne de concentration pilaire en cet élément, mesurée sur les chiens sains et malades est de 96,5 μg . Son écart type valant 101 μg .

Le lot témoin présente une moyenne corrigée de concentration pilair en Aluminium (173 µg) supérieure à celle des autres groupes (sauf celui des troubles digestifs à 107 µg). Les chiens épileptiques (101 µg) montrent eux aussi une légère augmentation de leur teneur pilair en Aluminium.

b) Cobalt

La valeur moyenne obtenue sur l'ensemble des chiens pour le Cobalt est de 1,6 µg, son écart type est de 1,01 µg.

Relativement au Cobalt, il est à noter que les chiens sains se distinguent de tous les autres par une concentration pilair bien supérieure (2,55 µg), ceci avec une très bonne fiabilité dans la plupart des cas ($p < 0,0001$). Au sein des maladies, les chiens en baisse d'état général (0,4 µg) présentent un taux en Cobalt plutôt inférieur, les chiens ayant des troubles urinaires (1,67 µg) un taux plutôt supérieur. Les inter-relations entre oligo-éléments sont nombreuses.

c) Cuivre

La moyenne générale mesurée pour cet oligo-élément est de 16 µg, son écart type de 7,38 µg.

En ce qui concerne le Cuivre, deux lots émergent : les chiens sains (19,7 µg) et ceux atteints de troubles urinaires (21 µg). Ils présentent ensemble des teneurs pilaires en Cuivre supérieures à celles des chiens ayant toutes les autres maladies représentées (sauf les troubles digestifs à 15,7 µg).

d) Fer

Sa moyenne globale est de 129 µg, avec un écart type de 135 µg.

Les chiens sains présentent une teneur pilair plus élevée en Fer (228 µg). Par comparaison entre maladies, l'épileptique (145 µg) présente une concentration pilair en Fer augmentée. Un chien ayant des troubles cutanés (66 µg) a une teneur au contraire abaissée.

e) Mercure

La moyenne des concentrations pilaires des chiens de notre étude est 2,03 µg, son écart type de 1,93 µg.

C'est le Mercure qui présente le plus de variations significatives entre maladies. C'est encore le groupe des chiens sains qui se détache avec une moyenne de concentrations pilaires en Mercure supérieure à celle de tous les autres groupes (3,98 µg), sauf les troubles digestifs (effectif de 3 chiens ayant une moyenne

de 2,67 µg). Les chiens hypothyroïdiens (2,17 µg) et épileptiques (2,12 µg) ont aussi tendance à montrer des résultats supérieurs.

f) Nickel

Cet élément donne une moyenne de concentration de 3,06 µg, un écart type de 2,07 µg.

La comparaison des concentrations pilaires en Nickel met en évidence beaucoup de disparités entre lots. Globalement, les chiens présentant une baisse d'état général ont une moyenne de concentrations pilaires plutôt inférieure (1,2 µg). Les chiens sains (3,59 µg), épileptiques (3,92 µg) ou atteints de troubles urinaires (4,11 µg), montrent une teneur en Nickel augmentée.

g) Plomb

Dans l'ensemble de notre étude, le Plomb a une concentration pilaire moyenne de 15,2 µg, un écart type de 19,4 µg.

Le schéma est différent pour le Plomb puisque cette fois les chiens sains présentent la moyenne la plus faible de tous les lots (7,52 µg). Ils se distinguent pour cela des chiens atteints de tumeurs (37 µg) surtout, mais aussi des chiens possédant des symptômes urinaires (16,2 µg) ou cutanés (16,8 µg).

Les chiens ayant une tumeur possèdent la concentration pilaire en Plomb la plus forte, significativement supérieure à tous les lots sauf les troubles digestifs (26,3 µg).

h) Sélénium

Le Sélénium de l'ensemble des chiens retenus pour cette étude se trouve dans les poils à une concentration moyenne de 0,67 µg pour un gramme, avec un écart-type de 0,47 µg.

Le lot témoin (1 µg) se distingue par une moyenne de teneurs pilaires en Sélénium bien supérieure. Au sein des 9 groupes de malades, les épileptiques (0,68 µg) ont tendance à donner des résultats supérieurs. Les chiens atteints d'inflammations chroniques (0,33 µg) présentent des teneurs plutôt inférieures.

i) Zinc

Enfin, le Zinc pilaire de nos chiens est en concentration pilaire moyenne de 169 µg, et a un écart type de 65,6 µg.

Tableau XVIII : Moyennes en oligo-éléments en fonction de la maladie

Dans la même colonne, deux moyennes présentant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes.

Maladies	Aluminium	Cadmium	Calcium	Chrome	Cobalt	Cuivre	Fer	Magnésium	Manganèse	Mercure	Nickel	Plomb	Sélénium	Zinc
Epilepsie	101 a	0,88 a	1289 a	0,76 a	1,60 a	14,5 a	145 a	137 a	11,2 a	2,12 a	3,92 a	18,3 a	0,68 a	147 ab
Baisse de l'état général	25,0 ab	0,20 a	454 a	0,20 a	0,40 b	8,00 a	28,4 ab	44,4 a	1,40 a	1,20 ab	1,20 b	9,40 ac	0,40 ab	86 a
Troubles articulaires	79,9 ab	0,36 a	1049 a	1,00 a	0,82 b	13,9 a	80,2 ab	125 a	3,55 a	0,64 b	2,64 ab	14,5 ac	0,55 ab	154 b
Troubles urinaires	72,7 ab	0,89 a	1218 a	1,00 a	1,67 ad	21,0 b	102 ab	126 a	6,78 a	0,78 bc	4,11 a	16,2 ac	0,56 ab	167 bc
Troubles cutanés	46,5 b	0,86 a	1743 a	0,94 a	1,20 ac	14,7 a	66,0 b	229 a	4,94 a	1,23 bd	2,49 b	16,8 a	0,57 ab	169 b
Inflammation et infection chronique	39,7 ab	0,56 a	712 a	0,67 a	1,22 abc	13,4 a	56,1 ab	74,3 a	2,33 a	0,22 b	2,22 bc	12,1 ac	0,33 b	165 bc
Hypothyroïdie	51,8 ab	0,83 a	624 a	0,50 a	1,17 abc	12,7 a	72,2 ab	80,0 a	4,17 a	2,17 acd	2,33 ab	16,3 ac	0,50 ab	159 abc
Tumeurs	58,9 ab	0,60 a	1109 a	0,60 a	1,00 bcd	14,1 a	96,6 ab	122 a	4,70 a	0,50 b	2,20 b	37,0 b	0,40 ab	214 c
Troubles digestifs	107 abc	1,00 a	1245 a	0,67 a	1,33 abc	15,7 ab	134 abc	260 a	9,00 a	2,67 ade	3,00 ab	26,3 abc	0,67 abc	132 ab
Chiens Sains	173 c	0,64 a	1332 a	1,14 a	2,55 e	19,7 b	228 c	121 a	21,8 a	3,98 e	3,59 ac	7,52 c	1,00 c	190 bc

Tableau XIX : Résultats obtenus sur l'ensemble des chiens (malades et sains)

Elément	Moyenne	Ecart type
Aluminium	96,5	101
Cadmium	0,71	0,77
Calcium	1284	1603
Chrome	0,89	0,79
Cobalt	1,60	1,01
Cuivre	16	7,38
Fer	129	135
Magnésium	144	245
Manganèse	10,5	26,3
Mercure	2,03	1,93
Nickel	3,06	2,07
Plomb	15,2	19,4
Sélénium	0,67	0,47
Zinc	169	65,6

En ce qui concerne cet élément, deux moyennes se distinguent : celle du lot des tumeurs et celle de la baisse d'état général. Les chiens atteints de tumeurs présentent, comme les chiens sains (190 µg), une teneur pilair en Zinc à tendance supérieure à celle des autres chiens (214 µg). Au contraire, les chiens présentant une baisse d'état général montrent des teneurs pilaires plutôt inférieures à celles de tous les autres lots (86 µg).

j) Conclusion

On peut avec tous ces résultats donner une approche des variations les plus notables sur le plan pilair, dans les maladies citées. La comparaison des moyennes se fera avec les moyennes globales de l'ensemble des chiens (tableau XIX).

1 Les chiens ayant des troubles cutanés ont une teneur en Fer légèrement inférieure dans les poils (66 µg contre 129 µg en moyenne chez les chiens malades).

2 Les chiens présentant des tumeurs ont une concentration pilair en Plomb nettement supérieure (37 µg contre 15,2 µg en moyenne chez les malades), en Zinc plutôt supérieure (214 µg contre 169 de moyenne).

3 Les chiens épileptiques peuvent présenter des taux de Nickel (3,92 µg), de Fer (145 µg), d'Aluminium (101 µg), de Sélénium (0,68 µg) et de Mercure (2,12 µg) légèrement supérieurs à la moyenne des chiens malades (soit respectivement 3,06 µg, 129 µg, 96,5 µg, 0,67 µg et 2,03 µg).

4 Les chiens à troubles urinaires ont des concentrations pilaires en Nickel (4,11 µg) et en Cobalt (1,67 µg) légèrement augmentées, en Cuivre beaucoup plus nettement (21 µg). Ceci par rapport aux moyennes générales qui sont respectivement de 3,06 µg, 1,6 µg et 16 µg.

5 Les chiens présentés en consultation pour baisse d'état général pourront, par analyse pilair, montrer une diminution de leurs teneurs en Zinc (86 µg), en Nickel (1,2 µg) et en Cobalt (0,4 µg). Les moyennes correspondantes pour l'ensemble des chiens sont les suivantes : 169 µg, 3,06 µg et 1,6 µg.

6 Les chiens hypothyroïdiens peuvent avoir une concentration pilair en Mercure (2,17 µg) légèrement augmentée par rapport à la moyenne des chiens (2,03 µg).

7 Les chiens présentant infections et/ou inflammations chroniques montrent une teneur en Sélénium (0,33 µg) à tendance inférieure par rapport à l'ensemble (0,67 µg).

8 Enfin, ce qui nous permettra de distinguer un poil de chien sain, c'est un ensemble de concentrations pilaires hautes, pour :

- le Cobalt (2,55 µg contre 1,6 µg),
- le Zinc (190 µg contre 169 µg),
- le Fer (228 µg contre 129 µg),
- l'Aluminium (173 µg contre 96,5 µg),
- le Cuivre (19,7 µg contre 16 µg),
- le Mercure (3,98 µg contre 2,03 µg)
- et le Sélénium (1 µg contre 0,67 µg).

Un chien sain présente aussi une concentration pilaire légèrement plus basse en Plomb (7,52 µg) que la moyenne (15,2 µg).

Autant prendre le problème à l'envers. Par rapport à la normale qui est l'état sain, les chiens malades présentent le plus souvent une augmentation de leur teneur pilaire en Plomb, associée à une diminution globale des autres oligo-éléments (essentiellement Zinc, Cobalt, Fer, Aluminium, Cuivre, Mercure, Sélénium).

IV Discussion

A Animaux sains

1. Sexe

(tableau X)

Le facteur "sexe" avait déjà été étudié auparavant. Aucune différence significative n'existe entre les teneurs pilaires en Zinc et en Cuivre de l'homme et de la femme (92).

D'après Sky-Peck (103), il existe des variations entre les teneurs pilaires de la femme et de l'homme. Mais les différences observées en plusieurs minéraux peuvent en partie s'expliquer par les traitements pilaires que les femmes utilisent (shampooings, lotions, gels, sprays...). Zlotkin (119) considère aussi que les traitements chez le coiffeur modifient beaucoup les concentrations pilaires en oligo-éléments.

Combs *et al* (25) ne font pas intervenir le sexe dans les facteurs ayant une influence sur les concentrations pilaires en oligo-éléments. Néanmoins, d'après Dormandy (30), « la plupart des éléments trace -sauf le Zinc- sont présents à une concentration notablement supérieure dans les cheveux féminins ».

2. Couleur des poils

En ce qui concerne le facteur «couleur des poils», nous avons mis en évidence 5 oligo-éléments dont la concentration variait : le Manganèse, l'Aluminium, le Cuivre, le Magnésium et le Calcium. (tableau XI)

D'après Combs (25), le *Magnésium* et le *Calcium* sont les minéraux les plus influencés par la couleur du poil. C'est ce que nous retrouvons dans notre étude, puisque ces deux éléments ont les coefficients de fiabilité les plus intéressants ($p < 0.0001$ dans les deux cas). Fisher *et al* (36) trouvent en effet des concentrations en Magnésium supérieures dans les poils noirs de bovins par rapport aux poils clairs ou non pigmentés.

Le *Manganèse* est lui aussi concerné par cette variabilité puisqu'il est en quantité inférieure dans les cheveux blancs (99). De même, par analyses pilaires humaines, Sky-Peck (103) montre que les cheveux blonds contiennent moins de manganèse que les bruns. Cet oligo-élément est donc bien lié à la couleur des phanères.

Sky-peck (103) démontre aussi que les cheveux roux contiennent plus de *Cuivre*. Pour conforter l'impact de la couleur sur la teneur pilaire en Cuivre, nous pouvons citer Petering (92) : « ... les cheveux noirs sont légèrement supérieurs aux autres couleurs par leur concentration en Cuivre. » De même Kellaway *et al* (54) annoncent une teneur en Cuivre supérieure dans les poils colorés.

3. Lot

L'effet «lot » s'observe sur 8 des 14 oligo-éléments (tableau XII). Au sein de ce facteur peuvent intervenir la race (peu nombreuses dans chaque élevage), l'alimentation (homogène pour un lot donné), l'environnement (qualité de l'eau, pollution ambiante, matériaux des cages...), les traitements (shampooings utilisés, types de brosses...).

C'est pourquoi chaque variation d'oligo-élément entre deux lots ne peut être explicitée simplement. Mais nous pouvons affirmer que le traitement du chien et la nature de son milieu de vie a un impact direct sur le dépôt des oligo-éléments sur les poils. Par exemple, l'Aluminium, le Chrome et le Fer sont des métaux qui peuvent se fixer sur les poils à partir du milieu.

4. Alimentation

Le facteur «alimentation » a une influence sur 4 oligo-éléments dans notre étude (tableau XIII) : l'Aluminium, le Fer, le Cuivre et le Chrome. Il est à noter que des sels de Fer sont parfois utilisés à des taux supra-normaux en tant que colorant d'aliments industriels.

Néanmoins, les aliments testés sont tous deux sous la forme de croquettes, de fabrication industrielle, et adaptés aux différents stades physiologiques du chien. Les constituants sont de même type, les deux aliments sont donc relativement peu différents. C'est pourquoi seuls 4 oligo-éléments présentent une variabilité notable.

La principale, voire la seule, source d'oligo-éléments pour nos carnivores domestiques est la ration. Entrent en ligne de compte la forme de l'apport (ion, complexe...), la qualité de l'eau de boisson et tous les éléments constitutifs (autres éléments traces, phytates...). Mais il est évident que toutes les variations internes des phanères (les variations externes tenant compte de la pollution ambiante, des traitements pilaires ...) varient en parallèle avec l'apport, à plus ou moins long terme certes...

Chez le cheval, Wells *et al* (113) démontrent que moins de 30 % de la variation de chaque minéral peut être attribué à sa prise alimentaire. Un faible niveau pilaire en tel élément est plutôt lié à un excès d'antagonistes ou d'agents interférant avec son absorption. L'ingestion d'un oligo-élément en excès affectera les taux sériques puis pilaires de plusieurs autres minéraux.

D'après Underwood (109), le niveau de Cuivre dans la laine est totalement dépendant de la nature de la ration. Il est sensiblement représentatif des réserves en Cuivre du foie (54). D'après Kuhlman et Rompala (57), la supplémentation en Cuivre (simultanée au Zinc et au Manganèse) n'a pas d'impact sur sa concentration pilaire chez la chienne. Combs *et al* (25) rapportent aussi une très faible relation entre le Cuivre pilaire et celui de la ration ou du foie.

L'Aluminium n'est pas un élément très utilisé par l'organisme (1µg par jour utilisé chez le rat). Tout excès se traduit par une augmentation de l'excrétion fécale et, à l'extrême seulement, par une rétention tissulaire (109). Le poil étant un site de dépôt, sa teneur en Aluminium est directement liée aux apports alimentaires excessifs. L'influence de certaines thérapeutiques ne peut être exclue. Les pansements gastriques utilisés fréquemment lors de troubles digestifs chez le chien sont souvent riches en Aluminium.

5. Race

(tableau XIV)

L'effet «race» a été décrit chez le chien (65) mais aussi dans d'autres espèces comme les humains (103), les chevaux (113), les bovins (96). Combs *et al* (25) mettent ces variations inter-races en parallèle avec la différence de texture et de couleur du poil ou du cheveu.

Zentec et Meyer (118) ont mis en évidence des différences entre races dans la tolérance digestive envers une ration alimentaire définie. D'une race à l'autre, les chiens n'absorbent pas avec la même efficacité les nutriments présents dans leur alimentation. Les minéraux de la ration, au même titre que les autres nutriments, ne seront pas absorbés avec la même efficacité chez le Lhasa Apso et chez le Coton de tuléar.

Meyer *et al* (81) ont comparé le fonctionnement digestif de 10 races de chiens différentes nourries par des aliments de deux types. Les résultats montrent des différences notables de la qualité et de la quantité de selles émises. Les grandes races fabriquent plus de matières fécales que les petites races, à partir du même aliment donné en quantité adaptée. Mais, au sein d'un format, il existe aussi des races plus ou moins sensibles.

Les différences entre races sont nombreuses et physiologiquement complexes. Des études plus systématiques nous permettront peut être d'interpréter ultérieurement les résultats de cette étude.

B Corrélations entre oligo-éléments

L'existence de corrélations entre concentrations pilaires est peut être totalement aléatoire. Cela expliquerait d'ailleurs la raison pour laquelle les liens ne sont pas constants d'une population de chiens à une autre (tableau XVI). Néanmoins, il semble intéressant de rechercher si certaines de ces corrélations minérales ont déjà été mises en évidence sur le plan métabolique.

L'interaction entre le Manganèse, le Cobalt, le Calcium et le Fer a lieu aux sites d'absorption digestifs (43, 72). Une interdépendance se trouve aussi, d'après notre étude, dans le stockage pilaire.

Le lien entre le Fer et le Cuivre dans les poils tient peut être au fait que la mobilisation et le transport du Fer font intervenir une enzyme Cuivre-dépendante (21, 47). La biodisponibilité de ces deux éléments est liée, comme pourrait l'être leur stockage dans le poil.

Le Chrome voit son absorption digestive diminuée lors de présence de Fer avec lequel il forme un complexe (31). Cette association se retrouve dans les phanères, les teneurs en ces deux minéraux étant liées.

La corrélation très forte que l'on retrouve dans le poil entre le Calcium et le Magnésium concorde avec un lien métabolique décrit par Mac Dowell (69), Kadzere *et al* (53) et le NRC (87).

Les interactions nombreuses du calcium pilaire avec les autres éléments peuvent s'expliquer par le fait que cet élément en quantité importante dans la ration peut altérer l'absorption digestive donc le passage dans l'organisme d'autres minéraux (68).

Underwood (109) a mis en évidence une interaction métabolique entre le Sélénium et le Mercure. Les concentrations pilaires de ces deux oligo-éléments sont elles-aussi liées.

Entre le Sélénium et le Cadmium, Schroeder et Nason (99) trouvent des effets métaboliques potentialisés. Leurs concentrations pilaires pourraient-elles être influencées l'une par l'autre suivant le même mécanisme ?

Autant de questions qui restent sans réponse aujourd'hui, devant le manque de données annexes.

C Animaux malades

Le lien entre les maladies évoquées et les minéraux présents dans les poils est délicat d'interprétation. En effet, la relation entre les teneurs pilaire et sérique des oligo-éléments n'a jamais été démontrée. De très nombreux articles en discutent mais les expérimentations fournissent des résultats divergents.

Pour chaque oligo-élément, nous discuterons des résultats de notre étude (tableau XVIII). Mais, afin de rendre cette discussion plus objective, nous exposerons l'état actuel des recherches sur la relation entre l'analyse pilaire et l'élément circulant.

1. Aluminium

La concentration pileaire en Aluminium de tous les chiens malades de notre étude est inférieure à celle des animaux sains (tableau XVIII). Seule l'implication de l'Aluminium dans l'inhibition de la calmoduline (50) peut expliquer son utilisation en cas de maladie.

La calmoduline est une protéine cytosolique qui active ou inhibe de nombreux systèmes enzymatiques intracellulaires. Elle a une grande importance biologique. Lors de réaction immunitaire, l'activation des systèmes de défense cellulaires la sollicite fortement. L'Aluminium, en tant que régulateur, intervient aussi. Sa concentration étant alors moindre dans le sang, il serait donc moins déposé dans les poils.

2. Cobalt

Le Cobalt n'a pas d'indications nutritionnelles directes, mais seulement indirectes, par l'intermédiaire de la vitamine B12 dont il est un des constituants (99).

Cet élément est en quantité diminuée chez les chiens de notre étude présentant une baisse d'état général. D'après Lamand (61), les premiers signes de carence en Cobalt observée chez des ruminants sont la perte d'appétit, le manque de vitalité, l'amaigrissement, l'abattement, la tristesse. Mais aucun symptôme de déficience en Cobalt n'a jamais été mis en évidence chez des monogastriques (109). Néanmoins, il est possible qu'une baisse d'état général s'accompagne d'une diminution du Cobalt circulant.

Les chiens amenés en consultation pour des troubles articulaires montrent aussi une teneur pileaire en Cobalt diminuée par rapport aux chiens sains (tableau XVIII).

L'étude du lot de chiens sains montre qu'il n'y a pas de relation évidente entre l'alimentation et la concentration pileaire en Cobalt. La diminution de la teneur pileaire peut être simplement liée à une diminution de l'efficacité de l'absorption digestive, à une modification de la répartition de cet oligo-élément dans l'organisme, ou à une plus grande utilisation de la vitamine B12 pour la défense immunitaire dans ces deux pathologies.

3. Cuivre

La corrélation entre le Cuivre pileaire et le cuivre hépatique donc disponible a été établie chez les bovins carencés à l'extrême (62), et en automne seulement (36). Bradfield *et al* (15) concluent quant à eux à une indépendance complète entre le Cuivre pileaire et le stock de l'organisme en cet élément chez l'homme.

La teneur pileaire en Cuivre a diminué dans tous nos lots de chiens malades sauf dans le groupe des chiens présentant des troubles urinaires (tableau XVIII).

Un parallèle peut être établi avec le Fer puisque la mobilisation et le transport de cet élément fait intervenir la céruloplasmine, enzyme Cuivre-dépendante (60, 96). La moindre concentration en Fer dans les poils en cas de maladie s'accompagnerait logiquement d'une diminution de celle du Cuivre.

Par ailleurs, le Cuivre intervient dans la synthèse de la mélanine et dans la kératinisation des phanères (3). Il semble logique de penser que, lors de carence générale, le Cuivre du bulbe pileux est le premier utilisé in situ pour assurer ces tâches.

Enfin, Underwood (109) note que la cuprémie est élevée dans la plupart des infections, aiguës et chroniques. De même, selon Houot et Tarallo (47), le Cuivre est utilisé dans la plupart des réactions inflammatoires, par l'intermédiaire de la céruloplasmine. Ce complexe inhibe l'ion superoxyde et ses dérivés, ce qui permet de circonscrire la réaction immunitaire. De façon générale, tout état inflammatoire doit nécessiter une mobilisation massive du Cuivre depuis tous les sites de stockage.

Houot et Tarallo (47) relatent une augmentation de la cuprémie chez tous les patients humains atteints de pathologie rénale chronique. Il explique que le taux important d'urée peut altérer le métabolisme hépatique du Cuivre. Une cuprémie augmentée ne modifie pas le Cuivre pileux dont le taux reste normal. De plus, le rein est un lieu de stockage important du Cuivre (96, 109). Lors de troubles urinaires, cette réserve pourra subvenir aux besoins accrus en Cuivre.

4. Fer

La concentration pileux en Fer diminue dans tous les cas de maladie de notre étude. Le Fer a un rôle dans le catabolisme cellulaire, il est cofacteur de nombreuses réactions d'oxydo-réduction (60). Lors de maladie, ces réactions s'accroissent, son utilisation est accrue. Il s'avère moins disponible pour l'édification pileux.

Une autre explication peut s'appuyer sur le fait que la papille dermique adapte la composition du poil en cours de synthèse aux nutriments disponibles. Moins de Fer circulant signifie donc moins de Fer dans les nouveaux poils.

5. Mercure

D'après Zlotkin (119), l'analyse pileux a montré un intérêt dans la détection d'une exposition excessive au Mercure. De même, Matsubara et Machida (78) démontrent que le poil est un indicateur raisonnable de la contamination des souris par le Mercure.

La concentration pileux en Mercure est diminuée chez tous les animaux malades sauf les épileptiques et les chiens présentant des troubles articulaires.

Underwood (109) note que le Mercure peut être stocké dans l'encéphale et dans l'hypophyse, d'où une absence d'effet pileux lors de troubles de type épileptiques.

6. Nickel

Le Nickel présente une concentration pilaire abaissée dans la plupart des maladies étudiées ici, sauf l'épilepsie et les troubles urinaires. C'est lors de baisse d'état général du chien que sa teneur est la plus faible (1,2 µg).

La carence en Nickel provoque une diminution de l'absorption du Fer donc une anémie (cause de fatigue générale). Le Nickel intervient aussi comme cofacteur de 6 enzymes de type déshydrogénase hépatique. La réduction d'activité de ces enzymes est à l'origine d'une nette diminution du glucose et du glycogène disponible dans le sang. Par voie de conséquence, l'énergie dont dispose l'animal sous forme d'ATP est très diminuée (55). Si la teneur pilaire en Nickel était corrélée à sa concentration sérique, nous pourrions attacher les symptômes de la carence générale à la diminution pilaire.

7. Plomb

Zlotkin (119) ainsi que Combs *et al* (25) écrivent que la mesure de la concentration pilaire en Plomb a montré un intérêt dans la détection d'une exposition excessive à cet élément. Le poil est donc un site de stockage du Plomb. Il peut donner des informations quant à la quantité de cet élément ingérée, sur toute la durée de la pousse du poil.

Cet élément est un poison toxique par accumulation (109). Spickett et Bell (105) montrent que l'absorption et la rétention du Plomb sont dose-dépendants, et ont lieu même lors d'une faible proportion de Plomb dans la ration.

Chez l'homme, lors d'exposition importante au plomb, sa concentration augmente dans la plupart des tissus et surtout les os, le foie, les reins et les cheveux (109). La corrélation entre la concentration pilaire en plomb et l'empoisonnement est aussi relatée par Combs *et al* (26).

Ces études peuvent expliquer pourquoi, dans nos résultats personnels, le Plomb est le seul oligo-élément dont la teneur pilaire augmente lorsque le chien est malade. Sa concentration dans les poils augmente d'ailleurs surtout lors de tumeurs.

L'implication du Plomb dans le processus de tumorigénèse chez le chien est due à l'altération de la synthèse de l'ADN et de l'ARN induite par cet élément (79). Les informations génétiques sont ainsi endommagées et les cellules modifiées. Une teneur pilaire augmentée indique que le chien a été exposé, donc que ces processus ont pu avoir lieu.

Dans les conditions normales, la rétention du Plomb est peu importante, mais son élimination, surtout à partir des poils, est quasi nulle. Cet oligo-élément s'accumule au cours du temps. Le chien dont la concentration pilaire en Plomb est plus élevée a-t-il été plus exposé donc fragilisé ou est-il de nature plus sensible au plomb et à d'autres maladies ?

8. Sélénium

D'après Lamand *et al* (62), l'analyse du Sélénium pilaire des poils permettrait assez bien d'estimer la quantité de sélénium ingéré chez les bovins. Le sélénium concentré dans les poils serait donc lié au taux disponible pour l'organisme.

Dans notre étude, les teneurs pilaires en Sélénium sont toujours inférieures chez les animaux malades par rapport aux animaux sains (tableau XVIII).

D'après notre étude minérale générale de la deuxième partie, le Sélénium est nécessaire pour la prévention de différentes maladies (109). Un organisme pauvre en Sélénium, dont le stock général est épuisé, sera plus sensible à diverses affections.

9. Zinc

Le lien entre concentration pilaire et taux circulant de Zinc dans l'organisme a été très controversé et très discuté. Lowe et Wiseman (66) considèrent que la disponibilité digestive du Zinc se traduit directement par l'accumulation dans le poil chez le chien. L'animal recevant une forme de Zinc particulièrement assimilable produit des phanères plus riches en Zinc. Fisher *et al* (36) utilisent aussi le poil comme support d'analyse afin de connaître le statut en Zinc des nouveau-nés.

Néanmoins, les études de Beeson *et al* (11) n'établissent aucune relation entre le Zinc pilaire et la supplémentation de la ration en cet élément. Lamand *et al* (62) écrivent que la carence en Zinc ralentit la croissance du poil, ce qui fausse les résultats d'analyse pilaire. Un poil ayant poussé moins vite a fixé des minéraux sur une plus longue période.

Au contraire, Miller *et al* (82) ainsi que Combs *et al* (26) montrent que le poil de bovins carencés en Zinc en contient moins que celui des animaux nourris de façon équilibrée. Puis, Vanderhoof *et al* (112) considèrent que le taux pilaire est communément reconnu comme un indicateur acceptable de la carence en Zinc. De plus, Ojo *et al* (89) relatent que le Zinc est l'élément le plus régulé dans le poil. Enfin, Combs *et al* (25) démontrent une diminution simultanée du niveau de Zinc dans les cheveux et dans le sérum chez des enfants carencés.

Dans notre étude, le Zinc voit son taux pilaire augmenter lors de tumeurs chez le chien et diminuer lors de baisse de l'état général (tableau XVIII).

La carence générale en Zinc, souvent décrite, débute par une modification de l'appétit, puis l'inappétence s'aggrave et s'accompagne d'un amaigrissement. Les animaux trient leur ration et ne mangent que très peu à la fois. Ils deviennent peu actifs, apathiques et «tristes» (61). Une «baisse d'état général» peut donc être associée avec une diminution du taux de Zinc circulant.

Et puis, lors de carence générale en Zinc, il y a mobilisation à partir des poils donc la concentration pilaire chute d'après Combs *et al* (26). Les symptômes précédemment décrits sont donc liés à une diminution du Zinc pilaire. En effet, d'après Underwood (109), les enfants présentant une diminution de concentration pilaire en Zinc ont des commémoratifs de perte d'appétit (l'un des symptômes associés à la baisse d'état général).

Underwood (109) reporte aussi l'augmentation du taux plasmatique de Zinc lors de tumeurs malignes, en équilibre avec une diminution de sa concentration intracellulaire observée dans la plupart des néoplasies humaines. Cette distribution nouvelle du Zinc est certainement liée à la présence indispensable du Zinc pour la croissance et la multiplication cellulaire. En effet, le Zinc est impliqué en tant que cofacteur dans la duplication de l'ADN (21), dans la formation de l'ARN (110) et dans la synthèse des protéines (12). Largué par les cellules saines, le Zinc peut être récupéré par les cellules tumorales afin d'assurer leur prolifération. Et plus de Zinc circulant signifie plus de Zinc qui se dépose, dans les poils notamment.

V Conclusion

L'étude des chiens sains montre que la normalité utilisée par le laboratoire de référence en France est à revoir. La moyenne établie chez les chiens sains de notre étude en est parfois bien différente. Des études plus nombreuses, ou sur un plus grand nombre de chiens, pourraient nous aider à obtenir des normes valables.

La variation des concentrations pilaires minérales est importante en fonction de l'individu, de sa race surtout. Son environnement et son alimentation ont aussi une influence. La couleur du poil n'a d'incidence que sur quelques concentrations en oligo-éléments.

La comparaison entre les chiens sains et les chiens malades montre une différence marquée. Les animaux sains possèdent des concentrations pilaires globales significativement supérieures à celles des chiens malades.

La différenciation entre maladies est au contraire peu nette. Aucun profil pilaire ne peut être attribué significativement à un lot pathologique. Néanmoins, il existe des tendances pour certains éléments à la variation lorsque l'animal est atteint d'une maladie donnée.

Les analyses pilaires ne montrent qu'un intérêt minime dans l'aide au diagnostic en pratique courante. Lors de forte suspicion, le dosage de certains minéraux pilaire peut néanmoins apporter une indication supplémentaire.

Conclusion générale

L'analyse pilaire chez les carnivores domestiques est d'interprétation délicate. Il existe beaucoup de biais liés à la contamination extérieure, à la méthode de traitement, au protocole de prélèvement.

Des exemples sont donnés par l'étude de chats maintenus dans des conditions expérimentales connues. Le mode de prélèvement (coupe ou poil de mue) a un impact sur les résultats, malgré les précautions de réalisation. De même, la période de réalisation de l'expérience a un effet direct sur certaines concentrations pilaires.

En ce qui concerne les chiens, il existe une variation des résultats en fonction de l'élevage d'origine. En plus du mode alimentaire, cela est probablement lié à la contamination extérieure, aux traitements appliqués...

La comparaison des résultats de notre étude aux normes couramment admises est cohérente pour les chats. Par contre, les moyennes obtenues chez les chiens sains de notre étude sont loin d'être superposables à celles utilisées par le laboratoire Français de référence. Des études complémentaires sont à effectuer.

L'interprétation physiologique des résultats, une fois les éléments exogènes occultés, reste délicate. En effet, les concentrations pilaires en oligo-éléments varient chez le chien en fonction de caractères propres. Le sexe n'a pas d'impact. Par contre, la race exerce une influence sur les résultats. La génétique joue donc un rôle dans la fixation des éléments dans les poils, ou plus largement, dans leur métabolisme. Le lien entre les teneurs minérales pilaires et l'alimentation semble logique car le poil, en cours de synthèse, utilise les nutriments disponibles dans le sang, dont les minéraux. La couleur du poil donc sa concentration en certains pigments, provoque aussi des modifications du profil minéral.

Le statut pathologique du chien a un impact net : le chien malade a des concentrations pilaires moindres en général, sauf pour le Plomb. Mais, d'une maladie à l'autre, les différences ne sont pas significatives. L'analyse pilaire permet de suspecter l'état malade du chien, sans pour autant donner d'informations plus précises quand à la maladie en cause.

Annexes

I : Aliment distribué aux chats de l'expérimentation

II : Méthode analytique du laboratoire SEROM

III : Exemple d'une feuille de résultats chats

IV : Exemple d'une feuille de résultats chiens

V : Nuage de points issu de l'analyse factorielle sur les chiens

ANNEXE I

Science Plan®



Feline Maintenance*

GUIDE ALIMENTAIRE

De nombreux facteurs, tels que l'environnement, le niveau d'activité, le stade de vie et l'individu lui-même, peuvent modifier la quantité d'aliment nécessaire. La quantité adéquate est celle pour laquelle l'animal adulte maintient son poids optimal. Les quantités qui suivent sont suggérées comme point de départ et doivent être ajustées au besoin, pour maintenir un poids optimum et distribuées en 1 à 2 repas quotidiens.

Aucune supplémentation n'est nécessaire et détruirait même l'équilibre nutritionnel de **Feline Maintenance***. Un bol d'eau fraîche doit être disponible en permanence.

Les quantités qui suivent sont indiquées comme point de départ et doivent être ajustées au besoin pour maintenir un poids idéal.

QUANTITE JOURNALIERE DE FELINE MAINTENANCE (toutes les formules)

Poids Corporel kg	Boîte(s) (156 g)	Sec (g)
2	$\frac{3}{4}$ - 1	30-40
3	1 - $1\frac{1}{3}$	45-55
4	$1\frac{1}{4}$ - $1\frac{2}{3}$	55-70
5	$1\frac{1}{2}$ - 2	60-85
6	$1\frac{2}{3}$ - $2\frac{1}{4}$	70-95

ANALYSE MOYENNE:

ANNEXE II

METHODOLOGIE DU LABORATOIRE SEROM

Lavage des phanères :

Un échantillon de poils pèse 400 mg, est prélevé au niveau de l'encolure par coupe ou par tonte. Ces poils sont déposés dans une enveloppe fermée et identifiée. Arrivé au laboratoire, chaque échantillon est enregistré et reçoit un numéro d'identification à 6 chiffres. La quantité de poils est estimée visuellement, si elle est inférieure à 150 mg, un prélèvement supplémentaire est demandé. Chaque échantillon est introduit dans un tube en polypropylène en vue du lavage. Chaque tube est numéroté. Les lavages sont au nombre de 7, de 10 minutes chacun, systématiquement suivis d'un égouttage. Les deux premiers lavages se font avec de l'acétone, les deux suivants avec de l'eau purifiée, ensuite deux à l'acétone à nouveau et enfin le dernier à l'eau déminéralisée dite UHQ (purifiée à l'aide du système ELGASTAT UHQ PS). Le dernier égouttage est soigné.

Le séchage a lieu dans une étuve à 60°C pendant 43 heures au minimum.

Minéralisation nitrique des phanères :

La minéralisation consiste, pour une pesée de 400 mg, à additionner 5 ml de HNO₃ dilués aux 2/3. A défaut, on prendra 200mg de poils et 2,5 ml d'acide dilué aux 2/3. Tous les tubes sont placés au bain-marie à 60°C pendant 3 à 4 heures. On additionnera alors à nouveau 5 ml de HNO₃ (2,5ml à défaut) et on chauffera au bain-marie selon les mêmes modalités.

Séquence d'analyse :

L'analyse a lieu ensuite, à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique à plasma couplé par induction. On appelle plasma un gaz totalement ionisé, neutre électriquement. Ce gaz transmet au système étudié (ici l'échantillon de poils traité), par voie thermique, l'énergie nécessaire à la production de son spectre d'émission. Ce spectre est alors étudié par l'appareil de capture.

L'appareil utilisé est un spectromètre automatisé qui comprend 5 parties :

- Un système d'introduction d'échantillon qui amène l'échantillon dans le plasma ;
- Un générateur électrique qui apporte l'énergie nécessaire au plasma et un ensemble d'automatismes ;
- Un système optique qui analyse le spectre émis par le plasma ;
- Un système de traitement du signal qui permet l'analyse qualitative et quantitative à partir du rayonnement émis ;
- Un système informatique qui réalise l'interface avec l'utilisateur.

Les résultats quantitatifs pour les 14 Oligo-éléments seront imprimés directement par la machine, exprimés en micro-grammes d'élément par gramme de poils.

Synoptique de la méthode de dosage des éléments métalliques dans les phanères : figure 15.
Présentation des résultats pour un chat en Annexe III, pour un chien en Annexe IV.

Laboratoire SEROM, ZA la haute Limouillère, rue E. Branly, BP28, 37230 Fondettes.

**ANNEXE III :
FEUILLE DE RESULTATS D'UN CHAT**

SEROM

Société d'études et de recherches en oligo-éléments et minéraux

Z.A. "La Haute Limouillère"
Rue Edouard Branly - B.P. 28
37230 FONDETTES - FRANCE
Tél. 02 47 49 34 30 - Fax 02 47 49 34 33

DATE : 26/04/2001

No d'analyse : 004073

Propriétaire : 14-C-00

Nom de l'animal :

Race :

Prescripteur : SANS

OLIGO-ELEMENTS	VOTRE VALEUR	NORMES	FAIBLE	NORMALE	ELEVEE
CALCIUM	1030,400	600,00- 1800,00			
CHROME	1,161	0,10- 1,00			
COBALT	2,078	0,70- 2,30			
CUIVRE	9,540	5,00- 15,00			
FER	19,182	25,00- 135,00			
MAGNESIUM	187,880	25,00- 185,00			
MANGANESE	0,325	0,40- 1,60			
SELENIUM	0,797	0,50- 15,00			
ZINC	167,480	75,00- 195,00			
ALUMINIUM	5,336	0,00- 50,00			
CADMIUM	0,423	0,00- 1,00			
MERCURE	4,509	0,00- 10,00			
NICKEL	3,346	1,50- 4,50			
PLOMB	8,619	0,00- 15,00			
	0,000	-			
	0,000	-			

Tous les oligo-éléments sont rapportés en microgrammes par gramme de poils.

LE RESPONSABLE LABORATOIRE

**ANNEXE IV :
PRESENTATION DES RESULTATS D'ANALYSE D'UN CHIEN**

SEROM

Société d'études et de recherches en oligo-éléments et minéraux

Z.A. "La Haute Linouillère"
Rue Edouard Branly - B.P. 28
37290 FONDETTES - FRANCE
TEL 02 47 49 34 30 - Fax 02 47 49 34 33

DATE : 05/09/2000

No d'analyse : 001805

Propriétaire : AVORMENT
Nom de l'animal : AVORMENT
Race : Cocker US

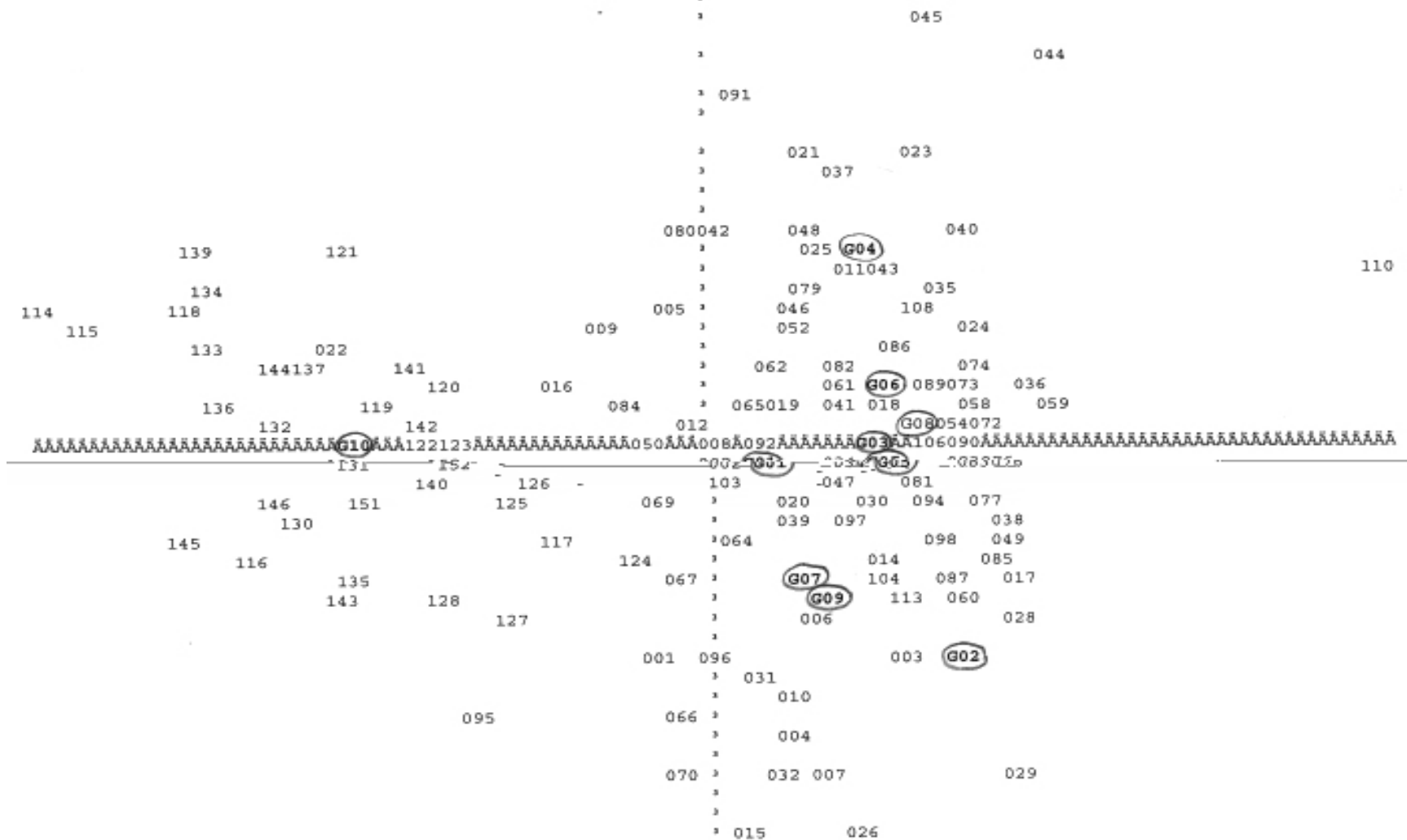
Prescripteur : SANS

OLIGO-ELEMENTS	VOTRE VALEUR	NORMES	FAIBLE	NORMALE	ELEVÉE
CALCIUM	2734,300	500,00- 1500,00			
CHROME	1,604	1,00- 3,00			
COBALT	3,124	1,50- 3,50			
CUIVRE	12,102	12,00- 28,00			
FER	384,310	7,00- 120,00			
MAGNESIUM	310,740	35,00- 200,00			
MANGANESE	124,930	3,00- 7,00			
SELENIUM	0,959	0,20- 1,00			
ZINC	143,630	170,00- 330,00			
ALUMINIUM	297,980	0,00- 50,00			
CADMIUM	0,678	0,00- 2,00			
MERCURE	3,776	0,00- 10,00			
NICKEL	3,708	3,00- 9,00			
PLOMB	6,941	0,00- 30,00			
	0,000	-			
	0,000	-			

Tous les oligo-éléments sont rapportés en microgrammes par gramme de poils.

ANNEXE V

Chaque point correspond à un chien prélevé. Chaque groupe de malades est représenté par un G suivi d'un nombre. G10 est au centre du nuage des chiens sains. On remarque qu'il se différencie des autres, beaucoup plus à gauche.



Bibliographie

- 1. AL-BAGDADI FK, TITKEMEYER CW, LOWELL JE. Hair follicle cycle and shedding in male beagles dogs. *Am. J. Vet. Res.* 1977, **38**, 611-616.
- 2. AL-BAGDADI FK, TITKEMEYER CW, LOWELL JE. Histology of the hair cycle in male beagle dogs. *Am. J. Vet. Res.* 1979, **40**(2), 1734-1741.
- 3. ALDER JF, SAMUEL AJ, WEST TS. The anatomical and longitudinal variation of trace element concentration in human hair. *Analytical Chimica Acta*, 1977, **92**, 217-221.
- 4. ALHAIDARI Z. Les alopecies. *Prat. Méd. Chir. Anim. Comp.*, 1991, **26**(4), 285-300.
- 5. ALHAIDARI Z, VON TSCHARNER CL. Anatomie et physiologie du follicule pileux chez les carnivores domestiques. *Prat. Med. Chir. Anim. Comp.*, 1997, **32**, 181-194.
- 6. ARNAUD J, FAVIER A. Le Zinc. In *Les oligo-éléments en médecine et biologie*. Lavoisier TEC&DOC, éditions Médicales Internationales, 1991, 653p.
- 7. BAKER KP. Hair growth and replacement in the cat. *Br. Vet. J.* 1974, **130**, 327-335.
- 8. BAKER KP, THOMSETT R. Canine and feline dermatology. Blackwell Scientific Publications, 1990, 295p.
- 9. BARUTHIO F. Le Cobalt. In *Les oligo-éléments en médecine et biologie*. Ed. Lavoisier tec et doc, 1991, 653p.
- 10. BARUTHIO F. Toxicologie des éléments trace essentiels. In *Les oligo-éléments en médecine et biologie*. Ed. Lavoisier tec et doc, 1991, 653p.
- 11. BEESON WM, PERRY TW, ZURCHER TD. Effect of supplemental zinc on growth and on hair and blood serum levels of beef cattle. *J Anim Sci* 1977, **45**(1), 160-165.
- 12. BENSIGNOR E. Dermatose améliorée par le zinc chez un caniche. *Point vétérinaire* 1996, **28**, 113-117.
- 13. BENTLEY PJ, GRUBB B. Effects of a zinc-deficiency diet on tissue zinc concentration in rabbits. *J. Anim. Sci.* 1991, **69** (12), 4876-4882.
- 14. BISSONETTE TH. Relations of hair cycles in ferrets to changes in the anterior hypophysis and to light cycles. *Anat. Rec.* 1935, **63**, 159-168.
- 15. BRADFIELD RB, CORDANO A, BAERTL J, *et al.* Hair copper in copper deficiency. *Lancet* 1980, **2**(8190), 343-4.
- 16. BURGER I., BOOLES D., EARLE K.E., *et al.* *Le livre Waltham de la nutrition des animaux de compagnie*. Edited by I. Burger, 1995, 160p.

- 17. BURTON G, MASON KV. The possible role of prednisolone in “Zinc-responsive dermatosis” in the siberian husky. *Australian Vet. Practitioner* 1998, **28**(1), 21-25.
- 18. BUTCHER EO. The hair cycle in the albino rat. *Anat. Rec.* 1934,**61**,5-19.
- 19. CALDWELL DE. Zinc toxicity in the dog. *Can. Pract.* 1994, **19**(6), 6-7.
- 20. CAMPBELL MH, MILLER JK. Effect of supplemental dietary Vitamin E and Zinc on reproductive performance of dairy cows and heifers fed excess Iron. *J.Dairy Sci.* 1998, **81**, 2693-2699.
- 21. CASE LP, CAREY DP, HIRAKAWA DA. *Canine and feline nutrition : A resource for companion animal professionals*, 1995, 455p.
- 22. CHESNEY CJ. The microclimate of the canine coat : the effects of heating on coat and skin temperature and relative humidity. *Vet. Dermatol.* 1997, **8**, 183-190.
- 23. CLEFFMAN G. Function-specific changes in the metabolism of agouti pigment cells. *Exp. Cell Res.* 1964, **35**, 590-600.
- 24. COLOMBINI S. Canine zinc-responsive dermatosis. *Veterinary clinics of North America : small animal practice.* 1999, **29**(6), 1373-84.
- 25. COMBS DK, GOODRICH RD, MEISKE JC. Mineral concentrations in hair as indicators of mineral status : a review. *J. Anim. Sci.* 1982,**54**(2),391-398.
- 26. COMBS DK, GOODRICH RD, MEISKE JC. Influence of dietary zinc or cadmium on hair and tissue mineral concentrations in rats and goats. *J. Anim. Sci.* 1983,**56**(1),184-193.
- 27. DEANTONIO SM, KATZ SA, SCHEINER DM, *et al.* Anatomically related variations in trace-metal concentrations in hair. *Clin. Chem.* 1982, **28**(12), 2411-2413.
- 28. DELCEUILLERIE F, PIGNY JP. Quel est votre diagnostic ? *Point Vét.* 1992, **23**(142), 103-105.
- 29. DOONG G, KEEN CL, ROGERS Q, *et al.* Selected features of copper metabolism in the cat. *J Nutr* 1983, **113**(10), 1963-71.
- 30. DORMANDY TL. Trace elements analysis of hair. *Br. Med. J.(Clin. Res. Ed.)* 1986, **293**(6553), 975-976.
- 31. DUCROS V. Le Chrome. In *Les oligo-éléments en médecine et biologie*. Lavoisier TEC&DOC, éditions Médicales Internationales, 1991, 653p.
- 32. DUNCAN A. Copper. *In practice* 1999, **19**, 503.
- 33. EBLING FJ, HALE PA. The control of the mammalian moult. *Mem.Soc.Endocr.* 1970, **18**, 215-237.

- 34. EBLING FJG, HALE PA, RANDALL VA. Hormones and hair growth. In *Physiology, Biochemistry, and Molecular biology of the skin*. 2nd édition; vol. 1, edited by Lowell A. Goldsmith
- 35. Editor. Zinc in hair as a measure of zinc nutriture in human beings. *Nutr. Rev.* 1970, **28**(8), 209-211.
- 36. FISHER DD, WILSON LL, LEACH RM, *et al.* Switch hair as an indicator of magnesium and copper status of beef cows. *Am J Res* 1985, **46**(11), 2235-40.
- 37. FLYNN A, FRATIANNE RB, HILL Jr OA, *et al.* Malversation in hair analyses. *Am. J. Clin. Nutr.* 1971, **24**(8), 893-895.
- 38. FRIENDSHIP RM, WILSON MR, GIBSON RS. The concentrations of copper, zinc, manganese and selenium in the hair of newborn piglets and their dams. *Can. J. Comp. Méd.* 1985, **49**(3), 308-310.
- 39. GRAHAM TW, HOLMBERG CA, KEEN CL, *et al.* A pathologic and toxicologic evaluation of veal calves fed large amounts of zinc. *Vet.Pathol.* 1988, **25**, 484-491.
- 40. GUAGUERE E. L'intérêt des A.G.E. n'est plus à prouver. L'action vétérinaire.
- 41. HALE PA. Periodic hair shedding by a normal bitch. *J.Small Anim. Pract.* 1982, **23**, 345-350.
- 42. HAMBRIDGE KM. Hair analyses. *Peditr. Clin. North Am.* 1980, **27**(4), 855-860.
- 43. HAND, THATCHER, REMILLARD, *et al.* Minerals. In *Small Animal Clinical Nutrition*. Ed. Mark Morris Institute. 4th Edition. 71-80.
- 44. HERCBERG S, PREZIOSI P, GALAN P. Le Fer. In *Les oligo-éléments en médecine et biologie*. Lavoisier TEC&DOC, éditions Médicales Internationales, 1991, 653p.
- 45. HILDERBRAND DC, WHITE DH. Trace-element analysis in hair : An evaluation. *Clin. Chem.* 1974, **20**(2), 148-151.
- 46. HORKY D, ILLEK J, PECHOVA A. Distribution of heavy metals in calf organs. *Vet.Med.-czech* 1998, **43**(11), 331-341.
- 47. HOUOT O, TARALLO P. Le Cuivre. In *Les oligo-éléments en médecine et biologie*. Lavoisier TEC&DOC, éditions Médicales Internationales, 1991, 653p.
- 48. INGLIS DM, GILMOUR JS, MURRAY IS. A farm investigation into swayback in a herd of goats and the result of an administration of copper needles. *Vet. Rec.* 1986, **118**, 657-660.
- 49. IYENGAR V, *et al.* Recent trends in analytical approaches for trace element determinations in biomedical investigations. *Prog. Clin. Biol. Res.* 1993, **380**, 329-354.

- 65. LOGAS D, KUNKLE GA, Mc DOWELL L. Comparison of serum zinc levels in healthy, systematically ill and dermatologically diseased dogs. *Vet.Dermatology* 1993, **4**(2), 61-64.
- 66. LOWE JA, WISEMAN J, COLE DJ. Zinc source influences zinc retention in hair and hair growth in the dog. *J Nutr* 1994, **124**(12 suppl.), 2575S-2576S.
- 67. LOVELL JE, GETTY R. The hair follicle, Epidermis, Dermis, and Skin Glands of the Dog. *Am. J. Vet. Res.* 1957, **18**, 873-885.
- 68. MACDOWELL L. R.. Calcium and Phosphorus. In *Minerals in animal and human nutrition*. Academic Press, 1992, 26-77.
- 69. MACDOWELL L. R. Magnésium. In *Minerals in animal and human nutrition*. Academic Press, 1992, 115-136.
- 70. MACDOWELL L. R. Iron. In *Minerals in animal and human nutrition*. Academic Press, 1992, 152-175.
- 71. MACDOWELL L. R. Cobalt. In *Minerals in animal and human nutrition*. Academic Press, 1992, 205-223.
- 72. MACDOWELL L. R. Manganese. In *Minerals in animal and human nutrition*. Academic Press, 1992, 246-264.
- 73. MACDOWELL L. R., Zinc. In *Minerals in animal and human nutrition*. Academic Press, 1992, 265-293.
- 74. MACDOWELL L. R. Selenium. In *Minerals in animal and human nutrition*. Academic Press, 1992, 294-332.
- 75. MACDOWELL L. R. Aluminium, Arsenic, Cadmium, Lead, and Mercury. In *Minerals in animal and human nutrition*. Academic Press, 1992, 352-365.
- 76. MANSON P, ZLOTKIN S. Hair analysis – A critical review. *Can. Med. Assoc. J.* 1985, **133**(3), 186-188.
- 77. MARRIOTT BM, *et al.* Copper, iron, manganese and zinc content of hair from two populations of rhesus monkeys. *Biol. Trace Elem. Res.* 1996, **53**(1-3), 167-183.
- 78. MATSUBARA J, MACHIDA K. Significance of elemental analysis of hair as a means of detecting environmental pollution. *Environ. Res.* 1985, **38**(2), 225-238.
- 79. MAUTINO M. Lead and zinc intoxication in zoological medicine : a review. *J.Zoo and Wildlife Med.* 1997, **28**(1), 28-35.
- 80. MEIDEROS D, STURNIOLO GC, MARTIN A, *et al.* Trace elements in human hair. *Lancet.* 1982, **2**(8298), 608.

- 81. MEYER H., ZENTEC J., HABERNOLL H., *et al.* Digestibility and compatibility of mixed diets and faecal consistency in different breeds of dog. *Zentralbl Veterinarmed A* 1999 Apr, **46**(3), 155-65.
- 82. MILLER WJ, POWELL GW, PITTS WJ, PERKINS HF. Factors affecting zinc content bovine hair. *J Dairy Sci* 1965, **48**(8), 1091-5.
- 83. MOONEY CT. Influence of hormones on the skin. Waltham Focus Special edition : Focus on skin and coat, 1999, 52p.
- 84. MOORE GPM, DU CROS DL, ISAACS K, *et al.* Hair growth induction : Roles of growth factors. In *The molecular and structural biology of hair*, ann.NY Acad.Sci., edited by Moore *et al.*
- 85. NEVE J, THEROND P. Le Sélénium. In *Les oligo-éléments en médecine et biologie*. Lavoisier TEC&DOC, éditions Médicales Internationales, 1991, 653p.
- 86. NOLI C *et al.* Focus on skin and coat. Special Edition. Waltham Focus 1999, 52p.
- 87. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Nutrient Requirements of Dogs*. Edited by National Academy Press, 1985, 79p.
- 88. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Nutrient Requirements of Cats*. Edited by National Academy Press, 1986, 78p.
- 89. OJO JO, *et al.* Correlations between trace element levels in head hair and blood components of Nigerian subjects. *Biol. Trace Elem. Res.* 1994, 453-9.
- 90. PACKMAN S, O'TOOLE C, PRICE DC, *et al.* Cadmium, zinc and copper metabolism in the mottled mouse, an animal model for menkes' kinky hair syndrome. *J. Inorg. Bioch.* 1983,**19**, 203-211.
- 91. PARAMESWARAN GUNARATNAM, WILKINSON GT. A study of normal hair growth in the dog. *J. Small An. Pract.* 1983, **24**, 445-453.
- 92. PETERING HG. Trace metal content of hair : Zinc and copper content of human hair in relation to age and sex. *Arch. Environ. Health* 1971, **23**(3), 202-207.
- 93. PINTA M. Physical methods of analysis and control of oligo-elements. *Ann. Nutr. Aliment.* 1971, **25**(5), B21-47.
- 94. REYNOLDS AJ, JAHODA CAB. Hair follicle stem cells? A distinct germinative epidermal cell population is activated in vitro by the presence of hair dermal papilla cells. *J.Cell Sci.* 1991, **99**(2), 373-385.
- 95. REYNOLDS AJ, JAHODA CAB. Inductive properties of hair follicle cells. In *The molecular and structural biology of hair*. ann.NY Acad.Sci., edited by Moore *et al.*
- 96. RIFFARD J. Le cuivre et les ruminants : 1ere partie : métabolisme, rôle, épidémiologie des carences. *Le point vétérinaire*, 1988 1989, **20**, n°118.

- 97. ROBINETTE CL. Zinc. *Vet.Clin.North Am. :Small An. Pract.* 1990, **20**, 539-545.
- 98. RYDER ML. Seasonal changes in the coat of the cat. *Research in veterinary science* 1976, **21**, 280-283.
- 99. SCHROEDER HA, NASON AP. Trace-element analysis in clinical chemistry. *Clin. Chem.* 1971,**17**(6),461-474.
- 100. SCOTT DW. The biology of hair growth and its disturbances. In *Advances in Veterinary Dermatology*. Halliwell : Claudia Von Tscharner, vol.1, 500p.
- 101. SCOTT DW, MILLER WH, GRIFFIN CE. Chapter I : Structure and function of the skin. *Muller and Kirk's Small Animal Dermatology*. 5th edition, 1995, 1213p.
- 102. SHAPCOTT D. More on use of hair in trace-metal analysis. *Clin. Chem.* 1978, **24**(2), 391-2.
- 103. SKY-PECK HH. Distribution of trace elements in human hair. *Clin. Physiol. Biochem.* 1990, **8**, 70-80.
- 104. SOUSA CA. Differential diagnosis of feline alopecia. In *The 25th Friskies Symposium on Feline Disease and Nutrition*. Washington D.C. Mars 1992.
- 105. SPICKET J.T, BELL R.R. The influence of diet on lead toxicity. In *trace element metabolism in man and animals*. Springer-Verlag, Edited by Gawthorne, Howel and White, 715p.
- 106. STRICKLAND JH, CALHOUN ML. The integumentary system of the cat. *Am. J. Vet. Res.* 1963, **24**, 1019-1029.
- 107. THODAY KL. Diet-related zinc-responsive skin disease in dogs : a dying dermatosis? *J.Small An. Pract.* 1989, **30**, 213-215.
- 108. TREGGAR RT. Hair density, wind speed, and heat loss in mammals. *J.Appl.Physiol.* 1965, **20**, 796-801.
- 109. UNDERWOOD EJ. *Trace elements in human and animal nutrition*. 4th edition. Academic Press, 1977, 545p.
- 110. USHIDA Y, MOON-FANELLI AA, DODMAN NH, *et al.* Serum concentrations of zinc and copper in bull terriers with lethal acrodermatitis and tail-chasing behaviour. *AJVR* 1997, **58**(8), 808-810.
- 111. VAN DEN BROEK AHM, STAFFORD WL, KEAY G. Zinc and copper concentrations in the plasma and hair of normal cats. *Vet.Rec.* 1992, **131**(22), 512-513.
- 112. VANDERHOOF JA, *et al.* Hair and plasma zinc levels following exclusion of biliopancreatic secretions from functioning gastrointestinal tract in humans. *Dig.Dis. Sci.* 1983, **28**(4), 300-305.

- 113. WELLS LA, LEROY R, RALTON SL. Mineral intake and hair analysis of horses in Arizona. *Equine Veterinary Science* 1990, **6**(10), 412-6.
- 114. WILSON C, COTSARELIS G, WEI Z, *et al.* Cells within the bulge region of mouse hair follicle transiently proliferate during early anagen : heterogeneity and functional differences of various hair cycles. *Differentiation* 1994, **55**, 127-136.
- 115. WOLTER R. Dermatose *et* alimentation chez les carnivores. *Recueil de médecine vétérinaire* 1995, **17**, 27.
- 116. ZANTOPOULOS N, ANTONIOU V, NIKOLAIDIS E. Copper, Zinc, Cadmium and Lead in sheep grazing in north Greece. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 1999, **62**, 691-699.
- 117. ZENTEK J, MEYER H. Investigations on Copper deficiency in growing dogs. *J. Nutr.* 1991, **121**, S83-S84
- 118. ZENTEK J, MEYER H. Normal handling of diets – are all dogs created equal ? *J Small Anim Pract.* 1995 Aug, **36**(8), 354-9.
- 119. ZLOTKIN SH. Hair analysis : A useful tool or a waste of money? *Int. J. Dermatol.* 1985, **24**(3), 161-164.

ANALYSES PILAIRES MINERALES CHEZ LE CHIEN ET LE CHAT

NOM et Prénom : DENIAU Sandrine

RESUME :

L'analyse pilaire est un examen complémentaire intéressant pour l'exploration du statut minéral. Le but de cette étude est de valider l'intérêt des analyses pilaires dans le cadre d'un diagnostic vétérinaire. La première partie introduit la physiologie d'un poil de carnivore et les différentes méthodes d'analyse. Une étude expérimentale sur un lot homogène de 11 chats met en évidence deux sources de variation des concentrations pilaires : la période où le poil est prélevé et la méthode utilisée. Des normes de résultats sont aussi proposées. La seconde expérience, concernant des chiens, permet de contrôler les normes de résultat admises en France. Elle pointe aussi certains facteurs individuels à l'origine d'une variabilité : race, alimentation, environnement, couleur du pelage. Le sexe du chien n'a pas d'influence. Les deux états sain et malade sont distincts sur la base d'analyses pilaires, le chien malade présentant de nombreuses concentrations significativement inférieures. Mais les analyses pilaires minérales ne donnent pas d'indication précise quant à la nature de la maladie.

Mots-Clés : Analyse pilaire

Chien

Carences minérales

Facteurs de variation

Minéraux

Oligo-éléments

Physiologie pilaire

Intoxications minérales

Chat

JURY :

Président Pr

Directeur Pr PARAGON

Assesseur Dr GUILLOT

Adresse de l'auteur :

Mademoiselle DENIAU

43 rue Gounod

06000 NICE

MINERALS IN HAIR ANALYSIS OF DOGS AND CATS

DENIAU
Sandrine

SUMMARY:

Hair analysis seems to be interesting to explore animals mineral status. The purpose of this study is to focus on hair analysis as a method for nutritional statement in dogs and cats. A first part introduce hairs physiology and analysis process. An experience upon 11 cats show how mineral content of hairs can be affected by period or method of hairs sample collect. In a second part, on dogs, control norms of results. It also shows effects of breed, hairs colour, nutrition and environment on mineral content of hair. Dogs sex has no influence on results. Comparison between safe and ill dogs make them different on mineral content basis. Many hair concentrations are diminished with pathology. Hair analysis may only help clinician to know if the animal is safe, without more information about type of illness.

KEY WORDS:

Hair analysis

Dogs

Mineral content of hairs

Mineral deficiencies

Hairs physiology

Minerals

Cats

Mineral intoxications

Trace minerals

JURY:

President	Pr
Director	Pr PARAGON
Assessor	Dr GUILLOT

Author's Address :

Miss DENIAU
43 rue Gounod
06000 NICE