

# Table des matières

Avant-propos.....	1
-------------------	---

## Chapitre 1 Composition des aliments

1. Généralités.....	5
2. Nutriments.....	6
2.1. Eau.....	6
2.1.1. Définitions – Eau et valeur nutritionnelle des aliments.....	6
2.1.2. Mesure du pourcentage d’humidité d’un aliment.....	7
2.1.3. Teneur en humidité des aliments.....	7
2.2. Glucides.....	8
2.2.1. Classification.....	8
2.2.2. Glucides pariétaux.....	8
2.2.3. Glucides cytoplasmiques.....	11
2.3. Lipides.....	14
2.3.1. Structure et propriétés.....	14
2.3.2. Dosage et répartition des lipides dans les aliments.....	16
2.4. Protides et matières azotées non protidiques.....	18
2.4.1. Nature des composés azotés des aliments.....	18
2.4.2. Dosage et répartition des matières azotées dans les aliments.....	19
2.5. Minéraux.....	20
2.5.1. Nature et classification.....	20
2.5.2. Dosage.....	22

2.5.3. Facteurs de variation de la teneur en minéraux des aliments .....	23
2.6. Vitamines .....	24
2.6.1. Nature et classification .....	24
2.6.2. Répartition des vitamines dans les aliments.....	26
3. Substances annexes intrinsèques et contaminants.....	28
3.1. Généralités .....	28
3.2. Substances annexes intrinsèques.....	28
3.2.1. Facteurs toxiques et antinutritionnels.....	28
3.2.2. Facteurs de protection .....	30
4. Additifs.....	31
4.1. Définition .....	32
4.2. Classification.....	33
4.3. Critères d'agrément et d'utilisation d'un additif – Réglementation	33
Questions et exercices .....	36
Bibliographie .....	37

## Chapitre 2

### Des aliments aux nutriments

1. Digestion et absorption des produits de la digestion chez les monogastriques.....	39
1.1. Digestion enzymatique et absorption des glucides .....	39
1.1.1. Digestion de l'amidon .....	39
1.1.2. Digestion des oligosaccharides dans l'intestin grêle.....	41
1.1.3. Absorption des oses.....	41
1.1.4. Rôle nutritionnel des fibres chez les monogastriques .....	42
1.2. Digestion enzymatique et absorption des lipides .....	43
1.2.1. Digestion intestinale.....	43
1.2.2. Lipases gastriques et pré-gastriques .....	44
1.2.3. Absorption des lipides .....	44
1.3. Digestion enzymatique des protéines.....	46
1.3.1. Enzymes protéolytiques .....	46
1.3.2. Digestion stomacale .....	47
1.3.3. Digestion intestinale.....	48
1.4. Microflore digestive et digestion bactérienne chez les monogastriques.....	48
1.4.1. Nature de la microflore digestive .....	48
1.4.2. Rôles physiologiques de la microflore .....	50
2. Digestion et absorption chez les ruminants.....	53
2.1. Fermenteur rumen .....	53
2.1.1. Paramètres physiologiques du fermenteur rumen .....	53
2.1.2. Micropopulation du rumen.....	54

2.1.3. Méthodes d'étude de la digestion microbienne dans le rumen .....	57
2.2. Digestion microbienne des glucides dans le rumen .....	60
2.2.1. Dégradation des glucides pariétaux et cytoplasmiques – Produits de la digestion .....	60
2.2.2. Perturbations des processus fermentaires et acidose .....	63
2.2.3. Absorption des acides gras à courte chaîne .....	65
2.3. Digestion microbienne des lipides dans le rumen .....	66
2.3.1. Hydrolyse et hydrogénation des lipides dans le rumen .....	66
2.3.2. Effet d'un apport supplémentaire de lipides sur la digestion microbienne .....	66
2.3. Digestion et métabolisme microbien de l'azote alimentaire dans le rumen .....	68
2.3.1. Dégradation et synthèse de l'azote alimentaire .....	68
2.3.2. Facteurs agissant sur la dégradation microbienne des protéines alimentaires .....	69
2.3.3. Facteurs agissant sur la synthèse microbienne .....	71
3. Digestibilité et biodisponibilité des nutriments .....	74
3.1. Digestibilité .....	74
3.1.1. Définition des coefficients de digestibilité .....	74
3.1.2. Détermination des coefficients de digestibilité .....	75
3.1.3. Facteurs de variation de la digestibilité dépendant de l'animal .....	80
3.1.4. Facteurs de variation de la digestibilité dépendant de l'aliment et de la ration .....	82
3.2. Biodisponibilité des nutriments .....	86
3.2.1. Notion de biodisponibilité – Définition – Intérêt .....	86
3.2.2. Mode d'expression de la biodisponibilité .....	87
3.2.3. Méthodes et critères de mesure de la biodisponibilité .....	88
4. Modificateurs de la digestion et de la digestibilité .....	92
4.1. Enzymes .....	92
4.1.1. Généralités .....	92
4.1.2. Enzymes utilisées .....	93
4.2. Antibiotiques .....	94
4.2.1. Effets zootechniques des antibiotiques .....	95
4.2.2. Risques potentiels de l'emploi des antibiotiques pour le consommateur et effet sur la qualité des productions animales .....	96
4.3. Probiotiques .....	97
4.3.1. Nature et propriétés des probiotiques .....	97
4.3.2. Effets zootechniques et sanitaires et mode d'action des probiotiques .....	98
4.4. Prébiotiques .....	99
4.4.1. Nature et propriétés des prébiotiques .....	99
4.4.2. Utilisation des prébiotiques en alimentation animale .....	100
Questions et exercices .....	101
Bibliographie .....	102

## Chapitre 3

### Utilisation métabolique des nutriments énergétiques et azotés

1. Utilisation métabolique des nutriments provenant de la digestion des glucides .....	105
1.1. Aspects généraux du métabolisme du glucose.....	105
1.2. Utilisation énergétique des glucides alimentaires chez les monogastriques .....	109
1.3. Utilisation des glucides alimentaires pour la synthèse des graisses de réserve chez les monogastriques.....	109
1.4. Particularités du métabolisme des glucides chez les ruminants.....	110
1.4.1. Origine du glucose .....	110
1.4.2. Synthèse des lipides de réserve et des graisses du lait .....	111
2. Utilisation métabolique des lipides alimentaires.....	111
2.1. Généralités .....	111
2.2. Acides gras essentiels (AGE).....	113
2.2.1. Mise en évidence et nature des AGE .....	113
2.2.2. Rôle biologique des AGE.....	114
2.2.3. Carence en AGE et sources alimentaires .....	116
2.3. Rôle énergétique des lipides .....	116
2.3.1. Utilisation énergétique directe des lipides .....	116
2.3.2. Stockage des lipides dans le tissu adipeux – Effets de la nature des lipides alimentaires sur la qualité des graisses de réserve .....	117
2.3.3. Effets des lipides alimentaires sur les lipides de l'œuf .....	120
2.3.4. Utilisation des lipides alimentaires pour la synthèse des lipides du lait chez les ruminants .....	121
2.3.5. Utilisation des lipides chez les ruminants non sevrés .....	123
3. Utilisation métabolique de l'azote alimentaire.....	123
3.1. Métabolisme azoté – Généralités .....	124
3.1.1. Pool métabolique et pool protéique.....	124
3.1.2. Protéosynthèse, protéolyse, turnover des protéines corporelles, bilan azoté.....	125
3.1.3. Métabolisme des acides aminés .....	127
3.1.4. Facteurs de variation de la protéosynthèse, de la protéolyse, du turnover des protéines et du bilan azoté.....	134
3.2. Couverture du besoin azoté.....	141
3.2.1. Facteurs d'efficacité des protéines alimentaires.....	141
3.2.2. Détermination du besoin azoté.....	149
3.2.4. Problèmes pratiques liés à la couverture du besoin azoté lors de l'établissement des rations.....	152
3.3. Particularités de la nutrition azotée chez les ruminants .....	158
3.3.1. Considérations générales.....	158
3.3.2. Système PDI : protéines digestibles dans l'intestin .....	159
3.3.3. Conséquences pratiques du métabolisme microbien de l'azote dans le rumen.....	160
Questions et exercices .....	163
Bibliographie .....	165

## Chapitre 4 Bioénergétique

1. Introduction .....	169
2. Définition et mesure de la valeur énergétique brute, digestible et métabolisable des aliments .....	170
2.1. Énergie brute .....	170
2.2. Énergie digestible .....	172
2.3. Énergie métabolisable .....	172
3. Détermination de l'énergie produite par oxydation des nutriments dans l'organisme et de l'énergie stockée dans les tissus .....	174
3.1. Calorimétrie directe .....	174
3.2. Calorimétrie respiratoire .....	174
3.3. Comment mesurer l'énergie correspondant à une variation de poids ? Le bilan azote carbone .....	177
4. Composants de la dépense énergétique .....	178
4.1. Métabolisme basal .....	178
4.2. Thermogenèse induite par la prise alimentaire et le métabolisme d'entretien .....	180
4.2.1. Composants de l'extra-chaueur .....	181
4.2.2. Origine de l'extra-chaueur .....	182
4.3. Dépenses liées à l'activité physique des animaux .....	183
4.4. Dépenses liées aux productions animales .....	185
4.4.1. Définition de l'énergie nette de production et de l'extra-chaueur de production .....	185
4.4.2. Dépenses de croissance et d'engraissement .....	185
4.4.3. Dépenses de gestation .....	187
4.4.4. Dépenses de lactation .....	187
4.5. Dépenses liées à la thermorégulation. Interactions avec les autres dépenses .....	188
4.5.1. Définition du noyau central, de l'écorce et équation générale des échanges thermiques .....	188
4.5.2. Pertes de chaueur .....	189
4.5.3. Température critique .....	191
4.5.4. Relation extra-chaueur et thermorégulation .....	194
4.5.5. Variations pathologiques de la thermogenèse et de la dépense énergétique .....	194
5. Systèmes et unités de rationnement énergétique .....	195
5.1. Considérations générales .....	195
5.2. Systèmes basés sur l'énergie digestible ou métabolisable .....	196
5.2.1. Remarques générales .....	196
5.2.2. Utilisation de l'énergie métabolisable pour le rationnement des carnivores domestiques – Considérations critiques .....	196
5.3. Systèmes basés sur l'énergie nette .....	199
5.3.1. Ruminants .....	199
5.3.2. Cheval – Système des UFC .....	201

Questions et exercices .....	201
Bibliographie .....	203

## **Chapitre 5**

### **Comportement alimentaire et régulation de l'ingéré**

1. Définitions et interrogations relatives au comportement alimentaire ....	205
2. Centres nerveux intégrateurs des informations aboutissant au comportement de faim et de satiété.....	206
3. Origine de la sensation de faim et initialisation du repas.....	208
4. Apparition de la satiété et contrôle du volume des repas.....	209
4.1. Généralités .....	209
4.2. Facteurs d'encombrement – Réplétion et distension de l'estomac	209
4.3. Osmorécepteurs et pression osmotique du contenu digestif .....	211
4.4. Signaux métaboliques de satiété .....	211
4.5. Additivité ou potentialisation des facteurs de satiété entre eux ....	212
4.6. Mécanisme lipostatique – Rôle de la leptine .....	212
5. Composantes sensorielles de la prise alimentaire .....	216
6. Régulation de l'ingéré chez les carnivores et le problème de l'obésité .	220
7. Ingestibilité et satiété chez les ruminants – Paradoxe de l'encombrement .....	223
8. Quelques points de repère pratiques.....	225
Bibliographie .....	226

## **Chapitre 6**

### **Eau et minéraux**

1. Eau.....	229
1.1. Introduction – Rôle de l'eau dans l'organisme .....	229
1.2. Répartition de l'eau dans l'organisme .....	230
1.2.1. Teneur en eau de l'organisme entier et des différents tissus et organes.....	230
1.2.2. Secteurs ou compartiments hydriques.....	231
1.3. Bilan de l'eau .....	231
1.3.1. Apports .....	232
1.3.2. Pertes .....	233
1.4. Régulation du bilan de l'eau .....	237
1.4.1. Régulation comportementale – Soif.....	237
1.4.2. Régulation rénale.....	239
1.5. Besoin en eau et couverture .....	240
1.6. Apports d'eau insuffisants et pathologie.....	240
1.7. Adaptation du dromadaire au défaut d'abreuvement.....	242
2. Caractéristiques générales des minéraux.....	243

3. Macroéléments .....	245
3.1. Calcium et phosphore.....	245
3.1.1. Répartition du calcium et du phosphore dans l'organisme et les productions animales .....	245
3.1.2. Rôles biologiques du calcium et du phosphore.....	246
3.1.3. Métabolisme du calcium et du phosphore.....	247
3.1.4. Besoins en phosphore et en calcium .....	255
3.1.5. Nutrition phosphocalcique et pathologie.....	258
3.2. Sodium, potassium, chlore .....	265
3.2.1. Répartition de Na, K, Cl dans l'organisme et dans les productions .....	265
3.2.2. Rôles biologiques du sodium, du potassium et du chlore ...	266
3.2.3. Métabolisme du sodium, du potassium et du chlore.....	267
3.2.4. Exemples de recommandations en sodium, chlore et potassium.....	269
3.2.5. Effet du niveau d'apport en sodium, potassium et chlore sur les performances et sur l'état de santé de l'animal.....	270
4. Magnésium.....	273
4.1. Répartition du magnésium dans l'organisme et dans les productions	273
4.2. Fonctions biologiques du magnésium.....	274
4.2.1. Excitabilité neuromusculaire.....	274
4.2.2. Métabolisme .....	274
4.3. Métabolisme du magnésium .....	274
4.3.1. Absorption.....	274
4.3.2. Excrétion .....	275
4.3.3. Mouvements du magnésium dans l'organisme .....	275
4.4. Exemple de recommandations .....	277
4.5. Perturbations de la nutrition magnésienne .....	277
4.5.1. Carence d'apport en magnésium chez la vache laitière .....	277
4.5.2. Tétanie d'herbage .....	278
4.5.3. Perturbations de la nutrition magnésienne chez les carnivores	279
4.5.4. Sex-ratio et équilibre potassium, calcium magnésium dans la ration.....	280
5. Oligoéléments.....	280
5.1. Généralités .....	280
5.1.1. Critères de définition et classification .....	280
5.1.2. Origine des carences en oligoéléments et facteurs de risque	281
5.1.3. Manifestations cliniques des carences et problèmes posés par leur diagnostic .....	282
5.1.4. Utilisation des oligoéléments comme additifs zootechniques au-delà de la couverture du besoin nutritionnel .....	283
5.1.5. Toxicité des oligoéléments.....	284
5.2. Fer .....	284
5.2.1. Répartition et fonction physiologique du fer dans l'organisme.....	284
5.2.2. Métabolisme du fer dans l'organisme .....	286
5.2.3. Carences en fer.....	287

5.3. Cuivre.....	290
5.3.1. Répartition et rôle biologique.....	290
5.3.2. Carence en cuivre.....	292
5.3.3. Hépatite par accumulation de cuivre chez le chien.....	295
5.3.4. Cuivre additif de croissance chez le porc.....	295
5.3.5. Intoxication par le cuivre.....	296
5.4. Sélénium.....	296
5.4.1. Répartition – Rôle biologique.....	296
5.4.2. Apports et couverture des besoins.....	297
5.4.3. Carence en sélénium.....	297
5.4.4. Intoxication par le sélénium.....	299
5.5. Manganèse.....	300
5.5.1. Répartition dans l'organisme et rôle biologique.....	300
5.5.2. Besoins en manganèse.....	300
5.5.3. Carence.....	300
5.6. Zinc.....	301
5.6.1. Répartition dans l'organisme et rôle biologique.....	301
5.6.2. Métabolisme.....	302
5.6.3. Recommandations et couverture des besoins.....	302
5.6.4. Perturbations de la nutrition en zinc.....	303
5.7. Iode.....	304
5.7.1. Répartition et rôle biologique.....	304
5.7.2. Métabolisme.....	304
5.7.3. Besoins et apports.....	306
5.7.4. Carences et excès d'iode.....	306
5.8. Cobalt.....	307
5.8.1. Rôle biologique du cobalt.....	307
5.8.2. Besoins et couverture.....	307
5.8.3. Carence en cobalt.....	307
5.9. Fluor.....	308
Questions et exercices.....	309
Bibliographie.....	310

## Chapitre 7

### Vitamines

1. Généralités.....	315
1.1. Éléments d'historique.....	315
1.2. Rôle biologique des vitamines.....	316
1.2.1. Relativité de la dépendance alimentaire pour les vitamines – Influence de l'espèce animale.....	317
1.2.2. Déficits, carences et excès vitaminiques en alimentation animale.....	318
1.2.3. Détermination des besoins et élaboration des recommandations.....	318
2. Groupe vitaminique A.....	319
2.1. Structure de la vitamine A et des caroténoïdes.....	319

2.2.	Métabolisme du rétinol et des pigments caroténoïdes .....	322
2.2.1.	Rétinol .....	322
2.2.2.	Caroténoïdes .....	324
2.2.3.	Facteurs modifiant le métabolisme du rétinol et des caroténoïdes.....	326
2.3.	Fonctions biologiques du rétinol et des caroténoïdes .....	326
2.3.1.	Caractères généraux .....	326
2.3.2.	Vision .....	327
2.3.3.	Croissance, développement et différenciation des tissus ....	327
2.3.4.	Rôle dans la reproduction.....	329
2.3.5.	Résistance contre les infections et les infestations.....	329
2.3.6.	Rôle antitumoral .....	330
2.3.7.	Fonctions anti-oxydantes spécifiques des caroténoïdes .....	330
2.3.8.	Existe-t-il un besoin spécifique en carotène, distinct du besoin en rétinol, chez les bovins pour la reproduction ? ...	330
2.3.9.	Hypervitaminose A .....	332
2.4.	Besoin en vitamine A et sa couverture.....	332
2.4.1.	Critères de détermination du besoin.....	332
2.4.2.	Apport de vitamine A chez l'animal et santé humaine .....	333
2.4.3.	Utilisation pratique des caroténoïdes pour la pigmentation de la peau des volailles et du jaune de l'œuf.....	333
2.4.5.	Exemples de besoins et de recommandations .....	334
3.	Groupe vitaminique D.....	334
3.1.	Nature, répartition, structure et propriétés .....	335
3.2.	Métabolisme.....	336
3.2.1.	Absorption et stockage de la vitamine D d'origine alimentaire.....	336
3.2.2.	Synthèse cutanée du cholécalciferol .....	336
3.2.3.	Synthèse de l'hormone 1,25 diOH D <sub>3</sub> .....	338
3.2.4.	Excrétion des vitamines D.....	339
3.3.	Rôle biologique .....	339
3.3.1.	Fonction biochimique et carence.....	339
3.3.2.	Hypervitaminose D .....	340
3.4.	Besoins – Recommandations – Apports .....	341
4.	Groupe vitaminique E .....	342
4.1.	Structure chimique, propriétés et répartition des vitamines du groupe E .....	342
4.2.	Métabolisme.....	344
4.3.	Rôle biologique .....	344
4.3.1.	Mécanisme d'action cellulaire .....	344
4.3.2.	Carences cliniques en vitamine E.....	345
4.3.3.	Effet de la supplémentation en vitamine E sur les performances et la santé animale .....	347
4.4.	Besoins et recommandations.....	349
5.	Groupe vitaminique K.....	350
5.1.	Nature, structure, propriétés et répartition des vitamines K.....	350
5.2.	Rôle biologique des vitamines K.....	350

5.2.1. Fonction biochimique.....	350
5.2.2. Carences spontanées en vitamine K chez les animaux .....	351
5.3. Couverture des besoins et apports en vitamines K .....	353
6. Groupe vitaminique B .....	354
6.1. Généralités .....	354
6.2. Vitamine B <sub>1</sub> ou thiamine.....	354
6.2.1. Structure, propriétés, répartition.....	354
6.2.2. Rôle biologique de la thiamine.....	358
6.2.3. Besoins et recommandations .....	359
6.3. Vitamine B <sub>2</sub> (riboflavine) .....	360
6.3.1. Structure – Propriétés – Répartition .....	360
6.3.2. Fonctions biologiques de la riboflavine .....	360
6.3.3. Besoins et apports.....	362
6.4. Acide pantothénique (vitamine B <sub>5</sub> ).....	362
6.4.1. Structure – Propriétés – Répartition .....	362
6.4.2. Fonctions biologiques .....	362
6.5. Vitamine B <sub>6</sub> (pyridoxine).....	363
6.5.1. Structure chimique .....	363
6.5.2. Fonctions biologiques .....	363
6.5.3. Recommandations .....	363
6.6. Vitamine PP (nicotinamide/niacine) .....	363
6.6.1. Structure chimique .....	363
6.6.2. Métabolisme : la double origine de la vitamine PP.....	364
6.6.3. Rôle biologique .....	364
6.6.4. Besoins et recommandations .....	365
6.7. Biotine (vitamine H ou B <sub>8</sub> ) .....	365
6.7.1. Structure chimique – Propriétés – Métabolisme digestif et disponibilité .....	365
6.7.2. Rôle biologique et carences spontanées en biotine .....	366
6.7.3. Recommandations et apports .....	368
6.8. Vitamine B <sub>12</sub> et acide folique.....	368
6.8.1. Structure chimique et propriétés de la vitamine B <sub>12</sub> et de l'acide folique .....	368
6.8.2. Métabolisme digestif et absorption de la vitamine B <sub>12</sub> chez les monogastriques.....	369
6.8.3. Rôles biologiques de la vitamine B <sub>12</sub> et de l'acide folique	369
6.8.4. Besoins – Recommandations .....	371
6.9. Vitamines du groupe B dans l'alimentation des ruminants .....	371
6.9.1. Indépendance alimentaire des ruminants sevrés pour les vitamines du groupe B.....	371
6.9.2. Vitamine B <sub>1</sub> et nécrose du cortex cérébral .....	372
6.9.3. Effet d'un supplément de vitamines du groupe B dans la ration des ruminants .....	373
7. Vitamine C .....	374
7.1. Structure – Propriétés physicochimiques et répartition de la vitamine C .....	374
7.2. Métabolisme de l'acide ascorbique.....	375

7.2.1. Dépendance alimentaire en fonction de l'espèce .....	375
7.2.2. Synthèse de la vitamine C chez les espèces non dépendantes .....	375
7.2.3. Dégradation et élimination .....	376
7.3. Rôle biologique de l'acide ascorbique .....	376
7.3.1. Fonctions biochimiques.....	376
7.3.2. Carence en vitamine C chez le cobaye.....	376
7.3.3. Effet d'un apport de vitamine C chez les espèces non dépendantes .....	377
7.4. Besoins et apports .....	377
Questions et exercices .....	378
Bibliographie.....	379

## Chapitre 8

### Allaitement et sevrage chez les mammifères domestiques

Introduction .....	381
1. Particularités morphologiques, anatomiques et physiologiques du jeune mammifère entre la naissance et le sevrage.....	382
1.1. Vitesse de croissance du nouveau-né.....	382
1.2. Particularités de la régulation thermique .....	382
1.3. Particularités du métabolisme à la naissance et pendant la période néonatale .....	384
1.4. Développement du tube digestif .....	385
1.4.1. Monogastriques .....	385
1.4.2. Ruminants.....	386
2. Lait et colostrum.....	387
2.1. Composition et valeur alimentaire du lait .....	387
2.1.1. Composition chimique globale du lait – Facteurs de variation interspécifiques .....	387
2.1.2. Facteurs intraspécifiques de variation de la composition du lait.....	389
2.1.3. Matières azotées du lait .....	389
2.1.4. Lipides du lait.....	391
2.1.5. Matières minérales du lait .....	392
2.1.6. Vitamines du lait .....	392
2.2. Production de lait par la mère et efficacité nutritionnelle .....	393
2.3. Colostrum.....	394
2.3.1. Composition – Valeur nutritionnelle.....	394
2.3.2. Rôle immunologique du colostrum.....	395
3. Allaitement et sevrage .....	395
3.1. Allaitement naturel.....	396
3.1.1. Comportement maternel : établissement de la relation entre la mère et le nouveau-né.....	396
3.1.2. Rythme des tétées et consommation de lait .....	396
3.2. Sevrage.....	397

3.3. Allaitement artificiel .....	399
3.3.1. Allaitement artificiel chez les ruminants producteurs de lait pour la consommation humaine .....	399
3.3.2. Allaitement artificiel dans les espèces non productrices de lait .....	400
4. Lait de jabot des pigeons .....	403
Bibliographie .....	404
Besoins nutritionnels des animaux domestiques .....	407
<b>Réponses aux questions et exercices</b> .....	409
<b>Index</b> .....	419