

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض
Faculté des sciences de la Nature et
de la Vie et des Sciences de la Terre



جامعة الجيلالي بونعامة – خميس مليانة
Université Djilali Bounaama
Khemis-Miliana

Polycopié de cours



ALIMENTATION ET RATIONNEMENT



Département : Sciences Agronomiques

Cycle : 3ème année Licence

Spécialité : Production Animale

Présenté par : Dr. MEKHELDI Khira

Année Universitaire : 2024 / 2025



Table des matières

Chapitre 01 : Utilisation et constitution des aliments (Notion d'aliment et d'alimentation-Physiologie de la digestion-Anatomie comparée de l'appareil digestif)	1
1. Notion d'aliment et alimentation	1
1.1 Aliment	1
1.2 Alimentation	1
1.3 Différents types des aliments.....	1
1.3.1. Aliments concentrés	1
1.3.2. Fourrages grossiers.....	3
2. Fourrages.....	3
2.1. Notion de fourrage.....	3
2.2. Différents systèmes de production fourragère	4
2.2.1 Prairies Permanentes	4
2.2.2 Prairies temporaires.....	5
2.2.3 Systèmes mixtes (cultures et prairies).....	5
2.2.4 Systèmes intensifs de production fourragère.....	6
2.2.5 Systèmes extensifs.....	6
2.2.6 Systèmes agroforestiers.....	6
2.3 Principales espèces fourragères cultivées.....	7
2.3.1 Graminées fourragères	7
2.3.2 Légumineuses fourragères.....	9
2.3.3 Autres Cultures Fourragères.....	11
2.3.4 Cultures Associées.....	12
2.4 Assolement fourrager	13
2.4.1 Systèmes de rotation typiques.....	13
2.4.2 Pratiques associées à l'assolement.....	13
2.4.3 Exemples d'assolement fourrager.....	14
2.5 Différents modes d'exploitation des fourrages.....	14
2.6 Procédés de conservation des fourrages (foin, déshydratation, ensilage)	15
2.6.1 Conservation par voie sèche.....	15
2.6.2 Conservation par voie humide : Ensilage et Enrubannage.....	16
2.7 Bilan fourrager.....	18
2.7.1 Définition	18
2.7.2 Etapes de réaliser un bilan fourrager.....	18



3. Constituants des aliments.....	19
3.1. Eau.....	20
3.2. Matière organique.....	20
3.2.1. Glucides et Lignine.....	20
3.2.2. Lipides.....	24
3.2.3. Matières azotées.....	24
3.2.4. Vitamines.....	25
3.2.5. Matière minérale.....	25
4. Anatomie comparée de l'appareil digestif des polygastriques et des monogastriques herbivores et granivores.....	26
4.1. Appareil digestif des animaux d'élevage (points communs et différences).....	26
4.1.1. Bouche et les dents.....	26
4.1.2. Estomac.....	28
4.1.3. Intestin grêle.....	32
4.1.4. Gros intestin.....	33
4.2. Quelques conséquences liées à ces différences d'anatomie.....	33
4.2.1. Digestion gastrique et digestion intestinale.....	33
4.2.2. Importance variable de la flore microbienne.....	33
4.2.3. Quel rôle jouent ces micro-organismes ?.....	35
4.3. Motricité et transit digestif.....	37
4.3.1. Chez les ruminants.....	37
4.3.2. Chez les monogastriques.....	38
4.4. Fonctions physiologiques de l'appareil digestive.....	39
4.4.1. Digestion des glucides.....	39
4.4.2. Digestion des lipides.....	42
4.4.3. Digestion des matières azotées.....	43
4.5. Rôle de la flore digestive.....	48
4.5.1. Microflore bactérienne.....	48
4.5.2. Protozoaires.....	50
4.5.3. Champignons.....	51
4.6. Absorption des nutriments.....	51
4.6.1. Chez les non-ruminants.....	51
4.6.2. Chez les ruminants.....	52
Chapitre 02 : Actions digestives des différentes espèces animales.....	55
1. Dégradation mécanique des aliments.....	55
1.1 Chez les ruminants.....	55
1.1.1 Broyage énergétique par 2 mastications.....	55



1.1.2	Insalivation abondante.....	56
1.1.3	Brassage prolongé	57
1.2	Chez le cheval.....	57
1.3	Chez les volailles	58
2.	Dégradation biologique des aliments.....	58
2.1	Fonction digestive propre aux herbivores	58
2.2	Milieu du rumen est stable.....	59
2.3	Les microbes vivent en symbiose pour eux-mêmes, mais l'animal en tire profit.	59
3.	Dégradation chimique des aliments.....	59
3.1	Digestion gastrique	60
3.2	Digestion intestinale	60
3.2.1	Diastases du suc pancréatique	60
3.2.2	Diastases du suc intestinal.....	60
Chapitre 03 : Alimentation énergétique		62
1.	Principes généraux sur l'énergie alimentaire.....	62
2.	Sources d'énergie alimentaire.....	63
2.1.	Glucides	63
2.2.	Lipides	63
2.3.	Protéines	63
3.	Besoins et dépenses énergétiques de l'organisme.....	63
3.1.	Besoin énergétique des animaux	63
3.2.	Dépenses d'énergie des animaux	64
3.2.1.	Dépenses d'entretien	65
3.2.2.	Dépenses de production	67
3.2.3.	Dépense d'extra-chaueur	69
4.	Utilisation de l'énergie alimentaire par l'organisme	69
5.	Mesure du métabolisme	70
5.1.	Méthode de calorimétrie directe	70
5.2.	Méthode de calorimétrie indirecte.....	70
6.	Différentes étapes de l'utilisation de l'énergie des aliments	71
6.1.	Énergie brute (EB).....	71
6.2.	Énergie digestible (ED)	71
6.3.	Énergie métabolisable (EM).....	72
6.4.	Énergie nette (EN).....	72
7.	Facteurs de variation du rendement de l'énergie métabolisable en énergie nette	73
7.1.	Influence de la matière sèche.....	73



7.2. Influence de la durée de consommation.....	73
8. Systèmes d'expression.....	74
8.1. Systèmes utilisant l'énergie digestible ou l'énergie métabolisable.....	74
8.2. Systèmes utilisant l'énergie nette.....	75
8.2.1. Ruminants.....	75
8.2.2. Chevaux.....	77
Chapitre 04 : Alimentation azotée.....	78
Introduction.....	78
1. Place des matières azotées en nutrition animale.....	78
2. Rôle des matières azotées dans l'organisme.....	78
3. Effets d'excès et de carence des matières azotées.....	79
3.1. Carence en matières azotées.....	79
3.2. Excès de matières azotées.....	80
4. Dépenses azotées de l'organisme.....	80
4.1. Dépenses azotées d'entretien.....	81
4.2. Dépenses azotées de production.....	81
4.2.1. Croissance.....	81
4.2.2. Gestation.....	81
4.2.3. Lactation.....	81
4.2.4. Production d'œufs.....	82
4.2.5. Production de laine.....	82
4.2.6. Travail musculaire.....	82
5. Couverture des dépenses azotées.....	82
5.1. Classification nutritionnelle des acides aminés.....	82
5.2. Notion de facteur limitant.....	83
5.3. Utilisation des matières azotées alimentaires.....	84
5.4. Importance des pertes d'azote.....	85
5.4.1. Au niveau digestif.....	85
5.4.2. Au niveau métabolique.....	85
6. Mode d'expression des apports et des besoins.....	86
6.1. Chez les monogastriques (volailles, lapins).....	86
6.2. Chez les ruminants.....	87
6.3. Chez les chevaux.....	87
7. Alimentation azotée des ruminants.....	88
7.1. Utilisation digestive des matières azotées.....	88
7.1.1. Transformations subies par les matières azotées dans le rumen-réseau.....	88

7.1.2.	Transformations subies par les matières azotées après le rumen-réseau.....	88
7.2.	Utilisation métabolique des acides aminés absorbés	89
8.	Système des protéines digestibles dans l'intestin grêle (PDI).....	89
8.1.	Expression de la valeur azotée.....	90
8.1.1.	Mécanisme des facteurs limitants : l'énergie ou l'azote fermentescibles	91
8.1.2.	Principe de la détermination des valeurs PDI des aliments.....	92
8.2.	Valeurs azotées des aliments.....	93
8.3.	Art du rationnement : associer les aliments.....	94
8.4.	Intérêts du système PDI : La complémentation azotée des rations	94
8.5.	Limites du système PDI.....	95
9.	Traitements technologiques améliorant la valeur azotée des aliments	96
9.1.	Dans le cas des tourteaux, le tannage	96
9.2.	Dans le cas de l'ensilage d'herbe.....	97
10.	Besoins en PDI de différentes espèces de poly-gastriques.....	97
10.1.	Besoins des bovins.....	97
10.1.1.	Besoin d'entretien journalier (BesPDI _{Ent})	97
10.1.2.	Besoins de croissance.....	97
10.1.3.	Besoin de production.....	97
10.1.4.	Besoin de gestation.....	97
10.1.5.	Besoins protéiques totaux journaliers	97
10.2.	Besoins en PDI des ovins.....	98
10.2.1.	Besoins d'entretien	98
10.2.2.	Besoins de gestation	98
10.2.3.	Besoins de production	98
10.2.4.	Agneau à l'engrais.....	99
10.3.	Besoins en PDI des caprins.....	99
Chapitre 05 : Alimentation minérale et vitaminique		100
I.	Alimentation minérale	100
1.	Aperçu introductif sur l'importance des minéraux chez les animaux d'élevage	100
2.	Rôles des éléments minéraux dans l'organisme	101
2.1	Des éléments "plastiques" qui construisent organisme et ses productions.....	101
2.2	Des régulateurs des fonctions de l'organisme.....	101
3.	Effets de carence des éléments minéraux	101
4.	Utilisation des éléments minéraux	102
4.1	Éléments minéraux doivent être assimilables.....	102
4.2	Organisme doit disposer de vitamines et un bon fonctionnement hormonal.....	102



4.3	Animal doit être capable de retenir les minéraux.....	103
4.4	Un certain équilibre doit exister entre les différents minéraux.....	103
5.	Eléments minéraux majeurs.....	104
5.1	Calcium et phosphore.....	104
5.1.1.	Rôles du calcium et du phosphore.....	104
5.1.2.	Symptômes des effets de carence.....	104
5.2	Magnésium.....	105
5.3	Sodium et Chlore.....	105
5.4	Potassium.....	105
5.5	Soufre.....	106
6.	Oligoéléments.....	106
6.1	Fer.....	106
6.2	Cuivre.....	107
6.3	Cobalt.....	107
6.4	Manganèse.....	107
6.5	Iode.....	107
6.6	Zinc.....	108
6.7	Sélénium.....	108
7.	Principes de l'alimentation minérale des animaux.....	109
8.	Apport de minéraux par les aliments.....	109
II.	Alimentation vitaminique.....	110
1.	Définition.....	110
2.	Rôles des vitamines.....	110
3.	Synthèse des vitamines.....	111
4.	Classification des vitamines.....	111
4.1.	Vitamines liposolubles.....	111
4.1.1.	Vitamine A, ou rétinol.....	111
4.1.2.	Vitamines du groupe D Antirachitique.....	112
4.1.3.	Vitamines du groupe E.....	112
4.1.4.	Vitamines K.....	113
4.1.5.	Vitamines F.....	113
4.2.	Vitamines hydrosolubles.....	113
4.2.1.	Vitamine C, ou acide ascorbique.....	114
4.2.2.	Vitamines de groupe B.....	114
Chapitre 06 : Mesures de l'utilisation digestive des différentes espèces animales (Mesure de la digestibilité-Facteurs de variation).....		118
1.	Digestibilité.....	118



1.1. Digestibilité apparente.....	118
1.2. Digestibilité réelle.....	118
2. Digestibilité des différents constituants cellulaires.....	119
2.1. Digestibilité des constituants intracellulaires.....	119
2.2. Digestibilité des constituants pariétaux.....	120
3. Conséquences sur la digestibilité de la matière organique.....	120
3.1. Chez les herbivores.....	121
3.1.1. Fourrages.....	122
3.1.2. Racines et Tubercules.....	122
3.1.3. Concentrés.....	123
4. Mesure de la digestibilité apparente.....	123
5. Mesure de la digestibilité réelle.....	124
Chapitre 07 : Aliments de Bétail.....	125
1. Deux méthodes de rationnement / Trois types d'aliments.....	125
1.1. Les aliments sont "simples" ou "composés".....	125
1.1.1. Aliments simples, produits ou non sur la ferme.....	125
1.1.2. Caractéristiques, valeur et emploi des principaux aliments simples.....	126
1.1.3. Aliments composés.....	131

Intitulé de l'UE : Unité d'enseignement Fondamentale 1

Crédit : 6

Coefficient : 3

Semestre : 5

Objectifs d'enseignements

Apprendre à l'étudiant les bases de la détermination des besoins nutritionnels et de l'établissement des rations alimentaires. A l'issue de cet enseignement l'étudiant doit être sensibilisé sur les répercussions de la conduite alimentaire sur l'entretien des animaux d'élevage et sur la qualité de leurs productions.

Alimentation et rationnement

L'alimentation et le rationnement des animaux domestiques sont deux concepts liés à leur nutrition, mais ils diffèrent dans leur application et leur objectif.

Définitions :

1. Alimentation

L'alimentation des animaux domestiques fait référence à l'ensemble des aliments et des nutriments fournis aux animaux pour répondre à leurs besoins nutritionnels.

2. Rationnement

Le rationnement des animaux domestiques consiste à contrôler et à limiter la quantité d'aliments fournie à un animal.

Objectifs :

1. Alimentation

L'objectif principal de l'alimentation est de fournir une nutrition équilibrée et adéquate pour soutenir la croissance, la reproduction, la production, la santé et le bien-être des animaux domestiques.

2. Rationnement

L'objectif principal du rationnement est de prévenir la suralimentation, l'obésité ou d'autres problèmes liés à la surconsommation d'aliments. Il peut également être utilisé dans le cadre de régimes spécifiques pour des besoins médicaux ou de gestion du poids

Introduction

La gestion de l'alimentation et du rationnement dans les élevages constitue une composante fondamentale pour assurer la productivité et le bien-être des animaux. Ce module vise à former les étudiants aux bases de la détermination des besoins nutritionnels et à l'élaboration de rations adaptées pour les différentes espèces animales, en tenant compte des objectifs de production (viande, lait, œufs) et des répercussions sur la santé animale.

Avec un volume global de 67h30 en présentiel et 82h30 de travail personnel, le cours allie théorie et travaux dirigés. Le programme, structuré en sept chapitres, couvre l'anatomie et la physiologie de la digestion, les systèmes alimentaires (énergétique, azoté, minéral et vitaminique), et inclut des exercices pratiques pour l'évaluation des besoins nutritionnels. En analysant les différents types d'aliments et les systèmes de production fourragère, les étudiants apprendront à gérer l'alimentation de manière optimale en fonction des besoins spécifiques des espèces monogastriques et polygastriques.

L'enseignement dispensé est destiné aux étudiants de troisième année de Licence en production animale, avec comme prérequis des connaissances en biologie et physiologie animale. Il vise à préparer les futurs professionnels à résoudre les défis liés à la nutrition animale et à contribuer au développement durable des filières d'élevage.

Liste des figures

Figure 1: Différents modes d'exploitation des plantes fourragères.	15
Figure 2: Constituants des aliments	19
Figure 3: Amidon sucre de réserve chez les plantes.....	22
Figure 4: Structure chimique de la cellulose.....	22
Figure 5: Modèle simplifié de la paroi primaire	23
Figure 6: Schéma des crânes des espèces (bovin, ovin, cheval et lapin) de A à D.	28
Figure 7: Paroi du rumen, du réseau, du feuillet et de la caillette, de A à D.	30
Figure 8: Evolution de l'estomac d'un veau d'élevage.....	30
Figure 9: Structure de l'estomac du cheval.....	31
Figure 10: Représentation schématique de l'appareil digestive des bovins.....	35
Figure 11: Représentation schématique de l'appareil digestive de la poule	36
Figure 12: Représentation schématique de l'appareil digestive des lapins.....	36
Figure 13: Représentation schématique de l'appareil digestive des chevaux	37
Figure 14: Digestion des glucides et l'absorption des produits obtenus.	41
Figure 15: Fermentation du glucose dans le rumen, et la synthèse des acides gras volatiles.41	
Figure 16: Digestion des matières azotées et l'absorption des produits obtenus	45
Figure 17: Digestion et l'absorption chez le cheval.....	46
Figure 18: Mécanisme de la caecotrophie chez le lapin.....	48
Figure 19: Digestion et absorption chez les ruminants	53
Figure 20: Localisation des phénomènes enzymatiques et microbiens et de l'absorption chez les ruminants, le cheval, lapin et le poulet	54
Figure 21: Différentes étapes de l'utilisation de l'énergie des aliments.....	71
Figure 22: Variations des rendements km, kl et kf en fonction du rapport $q = EM/EB$	75
Figure 23: Utilisations digestive et métabolique de l'azote alimentaire.....	85
Figure 24: Niveaux d'expression des apports et des besoins azotés.....	86
Figure 25: Principe de la détermination du système PDI.....	90
Figure 26: Premier cas l'azote dégradable est le facteur limitant	91
Figure 27: Deuxième cas l'Energie fermentescible est le facteur limitant.....	92
Figure 28: Fixation et Mobilisation de Ca par un mécanisme hormonal	103
Figure 29: Digestibilité de la matière organique (dMO) chez différents types d'animaux en fonction de la teneur en cellulose brute (CB) de l'aliment	121
Figure 30: Digestibilité de la matière organique des principaux aliments des chevaux selon la teneur en cellulose brute.....	121
Figure 31: Cage de digestibilité	123
Figure 32: Méthode in sacco, vache fistulée	124

Liste des tableaux

Tableau 1: Principaux glucides cytoplasmiques et constituants pariétaux d'une cellule végétale.	20
Tableau 2: Zone de neutralité thermique de différentes espèces animales	67
Tableau 3: Composition moyenne d'un kilogramme de lait de différentes espèces et dépense énergétique associée	67
Tableau 4: Quantité d'énergie fixée dans le croît de bovins de race, sexe et poids différents (kcal/kg de croît de la masse corporelle).....	68
Tableau 5: Croissance et fixation énergétique dues à la gestation pour une brebis portant un agneau pesant 5 kg à la naissance	68
Tableau 6: Valeur protéique du lait selon la race bovine laitière	81
Tableau 7: Effets de la distribution de quatre protéines alimentaires sur la protéosynthèse et l'excrétion urinaire d'azote.....	84
Tableau 8: Composition en acides aminés en g pour 16 g d'azote des matières azotées des aliments, des microorganismes du rumen et des tissus	89
Tableau 9: Valeurs PDI et valeur azotée de deux aliments (orge et tourteau de colza) et de trois associations de ces deux aliments (e/kg brut)	94
Tableau 10: Apports recommandés totaux et capacité d'ingestion des brebis en fin de gestation selon le poids des brebis et le poids de la portée.....	98
Tableau 11: Digestibilité de quelques aliments pour ruminants.....	118
Tableau 12: Digestibilité de la matière organique de quelques fourrages chez les ruminants et les chevaux	122
Tableau 13: Digestibilité des aliments concentrés chez les ruminants et les chevaux.....	123
Tableau 14: Caractéristiques, valeur et emploi des principaux aliments simples	126

Chapitre 01 : Utilisation et constitution des aliments (Notion d'aliment et d'alimentation-Physiologie de la digestion-Anatomie comparée de l'appareil digestif)

1. Notion d'aliment et alimentation

1.1 Aliment

Un aliment est une source de nutriments indispensables pour l'organisme, fournissant l'énergie nécessaire et les matériaux de construction essentiels à la croissance, au maintien et aux fonctions vitales. Les aliments apportent des substances nutritives cruciales telles que les glucides, les protéines, les lipides, les vitamines et les minéraux. Ces nutriments sont nécessaires pour répondre aux divers besoins physiologiques des animaux, notamment pour le développement, la réparation des tissus, la production de chaleur et la réalisation des fonctions biologiques.

1.2 Alimentation

L'alimentation est l'ensemble des processus par lesquels un organisme ingère et assimile des aliments pour subvenir à ses besoins nutritionnels. Elle ne se limite pas à la simple ingestion de nourriture, mais inclut également la sélection, la préparation et l'administration des aliments dans des proportions et des combinaisons spécifiques pour assurer une nutrition équilibrée. Puisqu'un seul aliment ne peut généralement pas couvrir tous les besoins nutritionnels d'un animal, une alimentation équilibrée est conçue à partir de plusieurs types d'aliments, combinés de manière à répondre à l'ensemble des exigences en énergie, en protéines, en fibres, en vitamines et en minéraux.

1.3 Différents types des aliments

En fonction de leur composition botanique et chimique, les aliments peuvent être classés en deux grandes catégories : les concentrés et les fourrages grossiers.

1.3.1. Aliments concentrés

Sont des aliments qui occupent peu de volume pour une valeur nutritive relativement élevée. Les aliments concentrés se caractérisent tous par des teneurs en matière sèche et en énergie élevées. Certains d'entre eux sont également riches en protéines, c'est le cas pour les graines de protéagineux et d'oléagineux.

On distingue 2 catégories d'aliments concentrés :

1.3.1.1. Aliments concentrés simples

Tels que les graines de céréales et leurs coproduits, les graines de protéagineux, les graines d'oléagineux et leurs coproduits, les tourteaux, et les pulpes séchées. Ces aliments concentrés simples sont donc les matières premières.

- a. Céréales et leurs coproduits : Elles représentent la principale matière première des aliments composés et par conséquent, l'aliment principal des monogastriques. Elles constituent un complément énergétique pour les ruminants.
- b. Graines protéagineuses et oléagineuses

Protéagineux : Les graines protéagineuses sont produites par des fabacées (légumineuses) : féverole, pois, lupin, vesce, haricot. Leur utilisation est due à leur richesse en protéines bien pourvues en lysine et déficitaires en acides aminés soufrés. Ces graines contiennent également en proportions variables des matières grasses, de l'amidon et des glucides pariétaux généralement bien digérés. Leur valeur énergétique est bonne.

Oléagineuses : Les graines de soja, colza et tournesol sont des graines oléagineuses caractérisées par leur richesse en matières grasses, située entre 20 et 45% du produit brut. Elles rapprochent une forte valeur énergétique à une bonne valeur protéique, d'où leur appellation d'oléo-protéagineux.

- c. Tourteaux : sont des coproduits d'huilerie, issus de l'extraction de l'huile des graines ou des fruits oléo-protéagineux, caractérisés par leur richesse en énergie et en matières azotées. La teneur des tourteaux en protéines est comprise entre 30 et 50% du produit brut. La composition de ces protéines diffère selon l'origine des tourteaux. On trouve notamment des tourteaux de soja, de tournesol et de colza. Par exemple, les tourteaux de soja sont riches en lysine alors que ceux de colza sont riches en méthionine
- d. Racines et tubercules et leurs coproduits : Les racines et tubercules résultent de l'accumulation de réserves glucidiques dans les parties souterraines des végétaux : racines de betterave, de carotte, de navet, tubercules de pomme de terre. Les racines et les tubercules sont caractérisés par leur richesse en eau : 75% pour la pomme de terre, 80 à 88% pour les betteraves fourragères.

Les racines et les tubercules sont pauvres en matières azotées et celle-ci contiennent peu de protéine. Ces aliments très ingestible et très digestible sont intéressants pour leur apport énergétique.

1.3.1.2. Aliments concentrés composés

Résultant d'un mélange d'aliments concentrés simples. Leur fabrication se réalise après mouture puis mélange d'aliments simples. Ils peuvent parfois contenir des fourrages broyés. Ils sont présentés sous des formes diverses : poudre, granulés ou miettes.

Les concentrés, qu'il s'agisse d'aliments concentrés simples ou composés, servent à équilibrer en azote et en énergie la ration établie à partir des fourrages.

1.3.2. Fourrages grossiers

Les fourrages grossiers représentent l'ensemble des constituants végétaux de la plante fourragère à l'exception des graines ou des racines (ou tubercules). Les fourrages grossiers peuvent être distribués

- ✓ En l'état ou fourrages verts
- ✓ Ou conservés, Fourrages conservés

2. Fourrages

2.1. Notion de fourrage

Selon le Larousse Agricole, le terme "fourrage" désigne l'ensemble des plantes ou parties de plantes utilisées pour l'alimentation des animaux, principalement les herbivores. Il s'agit principalement de l'appareil végétatif des plantes, telles que les tiges et les feuilles, qui sont soit broutées directement par les animaux, soit récoltées, conservées, et ensuite distribuées sous forme de foin, d'ensilage, ou d'autres types de fourrages conservés.

Les fourrages sont essentiels dans l'alimentation animale en raison de leur apport en glucides, fibres, et autres nutriments essentiels. Ils peuvent être fournis sous différentes formes en fonction de leur teneur en matière sèche et de leur mode de conservation :

Les fourrages verts : Contenant entre 10% et 25% de matière sèche, ces fourrages sont généralement consommés frais par les animaux. Ils constituent une source importante de nutriments pendant la période de pâturage.

Les ensilages : un taux de matière sèche assez élevé (idéalement 35 %), car à un taux inférieur, l'ensilage produit des jus qui sont autant de pertes, les ensilages sont obtenus par fermentation anaérobie de plantes récoltées à un stade spécifique de croissance. Ce processus permet de conserver les fourrages pour une utilisation en dehors de la saison de pousse, tout en préservant une grande partie de leur valeur nutritive.

Les fourrages secs : Comprenant plus de 85% de matière sèche, ces fourrages, tels que les foin et les fourrages déshydratés, sont conservés par séchage. Ce type de conservation permet une longue durée de stockage tout en maintenant les qualités nutritives des plantes.

Les fourrages proviennent de différentes familles botaniques, notamment les poacées (graminées), les fabacées (légumineuses), et les brassicacées (crucifères). Ils sont constitués des parties aériennes des plantes, telles que les tiges, les feuilles et l'appareil reproducteur. Ces aliments, riches en glucides pariétaux, sont essentiels pour répondre aux besoins énergétiques et nutritionnels des animaux tout en contribuant à la santé de leur système digestif.

2.2. Différents systèmes de production fourragère

Les systèmes de production fourragère illustrent la diversité des approches possibles en production fourragère, chacune avec ses avantages et ses défis. Le choix du système le plus adapté dépend des objectifs spécifiques de l'exploitation, des ressources disponibles, et des conditions environnementales locales.

2.2.1 Prairies Permanentes

Les prairies permanentes sont des zones où les plantes herbacées pérennes prédominent, et où la végétation n'a pas besoin d'être replantée chaque année. Elles fournissent une source de fourrage stable pour le bétail, surtout dans les régions où la conversion en terres cultivables est difficile ou non souhaitable. Un des principaux avantages des prairies permanentes est leur stabilité écologique. En effet, ces écosystèmes offrent une couverture végétale continue, ce qui aide à prévenir l'érosion du sol tout en favorisant la biodiversité. De plus, une fois établies, elles nécessitent un faible coût d'entretien, car elles demandent moins d'intervention humaine, comme le labour ou le semis, comparé aux prairies temporaires.

Cependant, les prairies permanentes présentent également certains inconvénients. Le rendement en fourrage est généralement inférieur à celui des prairies temporaires ou des cultures intensives, ce qui peut limiter leur productivité. De plus, elles offrent moins de flexibilité, ce qui rend plus difficile leur adaptation aux besoins fourragers spécifiques ou aux changements

environnementaux soudains. Ces limitations doivent être prises en compte lors de la planification des systèmes de production fourragère pour garantir leur efficacité et durabilité.

2.2.2 Prairies temporaires

Les prairies temporaires sont spécifiquement semées pour produire du fourrage sur une période limitée, généralement entre trois et cinq ans. Elles sont souvent composées de mélanges de graminées et de légumineuses, choisis pour maximiser la production fourragère. Un des principaux avantages de ces prairies est leur rendement supérieur. En effet, la sélection d'espèces à croissance rapide et à haut rendement permet d'obtenir des quantités significatives de fourrage en peu de temps. De plus, ces prairies s'intègrent bien dans des systèmes de rotation des cultures, ce qui aide à améliorer la fertilité des sols tout en réduisant la pression des mauvaises herbes et des maladies.

Cependant, la mise en place de prairies temporaires peut représenter un coût d'établissement important, nécessitant des investissements en semences, en préparation du sol, et parfois en irrigation. De plus, leur gestion est plus complexe, demandant une planification rigoureuse pour optimiser à la fois le rendement et la qualité du fourrage produit. Ces facteurs doivent être soigneusement considérés pour assurer la rentabilité et l'efficacité des prairies temporaires dans le cadre d'un système de production fourragère.

2.2.3 Systèmes mixtes (cultures et prairies)

Ces systèmes combinent la production de cultures fourragères annuelles, telles que le maïs ou l'orge, avec des prairies pour maximiser la production de fourrage tout en assurant une certaine stabilité écologique. Un des principaux avantages de ces systèmes mixtes est leur flexibilité, car ils permettent une grande adaptabilité dans le type de fourrage produit, ajustable en fonction des besoins spécifiques du bétail ou des conditions climatiques. De plus, ils optimisent l'utilisation des ressources en exploitant les différentes saisons de croissance pour produire du fourrage tout au long de l'année.

Cependant, la gestion de ces systèmes peut être complexe. Elle exige une planification minutieuse des rotations et des pratiques culturales afin d'éviter la dégradation du sol et de maintenir une productivité élevée. En outre, la production de cultures fourragères peut entraîner une dépendance accrue aux intrants, tels que les engrais et les produits phytosanitaires, ce qui peut poser des défis supplémentaires en termes de durabilité et de coût.

2.2.4 Systèmes intensifs de production fourragère

Les systèmes intensifs sont conçus pour maximiser la production de fourrage par unité de surface, souvent grâce à une utilisation intensive d'intrants tels que les engrais, l'irrigation, et les semences à haut rendement. Ces systèmes comprennent souvent la production d'ensilage de maïs, de luzerne, et d'autres cultures spécialisées.

L'un des principaux avantages de ces systèmes est leur haut rendement. En effet, ils permettent de produire une grande quantité de fourrage, ce qui est essentiel pour les élevages à forte densité animale. De plus, grâce à des systèmes irrigués et des rotations bien planifiées, il est possible de garantir une production continue de fourrage tout au long de l'année.

Cependant, ces systèmes présentent également des inconvénients notables. La dépendance aux intrants est l'un des principaux problèmes, car ces systèmes nécessitent une forte utilisation d'engrais, d'eau, et de produits chimiques, ce qui peut entraîner des coûts élevés. De plus, l'impact environnemental est significatif : l'utilisation intensive de produits chimiques et d'eau peut entraîner des problèmes tels que la pollution des eaux et la dégradation des sols.

2.2.5 Systèmes extensifs

Les systèmes extensifs se caractérisent par l'utilisation de grandes superficies de pâturages naturels ou semi-naturels, avec une faible densité animale et un minimum d'intrants. Ces systèmes sont courants dans les zones marginales ou difficiles à cultiver.

Un des principaux avantages de ces systèmes est leur faible coût. Le recours minimal aux intrants rend leur exploitation peu coûteuse. De plus, ces systèmes respectent l'écosystème en favorisant la conservation de la biodiversité et le maintien de paysages naturels.

Cependant, ils présentent aussi des inconvénients notables. Le rendement en fourrage est souvent faible, ce qui nécessite de vastes superficies pour nourrir un nombre significatif d'animaux. En outre, les systèmes extensifs sont souvent plus vulnérables aux conditions climatiques, comme les sécheresses, ce qui peut affecter leur performance.

2.2.6 Systèmes agroforestiers

L'agroforesterie combine la production fourragère avec la culture d'arbres et d'arbustes, offrant ainsi une diversité de produits tels que le fourrage, le bois, et les fruits. Ce type de système contribue également à améliorer la résilience des exploitations face aux changements climatiques.

Parmi les avantages, la diversification des revenus est notable. Les agriculteurs ont la possibilité de tirer des bénéfices de la vente de bois, de fruits, ou d'autres produits en plus du fourrage. De plus, l'agroforesterie améliore la biodiversité en créant des habitats pour la faune et en contribuant à la santé des sols.

Cependant, ce système présente aussi des inconvénients. La gestion d'un système agroforestier est complexe et requiert des compétences spécifiques en gestion d'arbres et d'animaux, ainsi qu'une planification à long terme. De plus, le coût initial d'établissement de ces systèmes peut être élevé, et les rendements économiques ne se réalisent souvent qu'après plusieurs années.

2.3 Principales espèces fourragères cultivées

2.3.1 Graminées fourragères

2.3.1.1 Avoine (*Avena sativa*)

L'avoine (*Avena sativa*) est une céréale annuelle largement utilisée dans l'alimentation animale en raison de ses qualités nutritionnelles et de sa polyvalence. Elle peut être cultivée aussi bien pour le pâturage que pour la production de foin ou d'ensilage. L'avoine est appréciée pour sa digestibilité élevée et sa teneur en fibres, ce qui en fait un excellent fourrage pour les ruminants ainsi que pour les chevaux. Elle est également riche en énergie et présente des teneurs modérées en protéines, ce qui contribue à l'équilibre des rations alimentaires. Sa capacité à bien s'adapter aux climats tempérés, ainsi qu'à supporter des conditions de sol relativement pauvres, en fait une culture prisée dans de nombreuses régions agricoles.

Cependant, l'avoine est sensible aux conditions météorologiques extrêmes, en particulier à la sécheresse, ce qui peut affecter son rendement. En dépit de cela, elle présente l'avantage d'une croissance relativement rapide, permettant une récolte ou un pâturage anticipé. De plus, l'avoine est souvent cultivée en association avec d'autres légumineuses pour améliorer la qualité du fourrage, notamment en termes de teneur en protéines. Bien qu'elle ne soit pas aussi productive que d'autres céréales comme le maïs ou le blé, l'avoine reste une composante essentielle dans de nombreux systèmes fourragers pour sa simplicité de culture et sa bonne valeur nutritionnelle.

2.3.1.2 Ray-grass (*Lolium* spp.)

Le ray-grass anglais (*Lolium perenne*) est une graminée vivace largement utilisée pour le pâturage et le foin. Apprécié pour sa capacité à produire rapidement un fourrage de qualité après le semis, il est tolérant au pâturage intensif et capable de repousser rapidement après avoir été brouté. Ce ray-grass offre une haute valeur nutritionnelle, étant riche en protéines et en énergie, ce qui le rend particulièrement adapté pour l'alimentation des ruminants. Il est également

résistant au piétinement. Cependant, il est sensible à la sécheresse, ce qui limite son utilisation dans les zones arides.

En revanche, le ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum*) est généralement bisannuel ou annuel, et est principalement utilisé pour les prairies temporaires en raison de sa croissance rapide et de son rendement élevé en foin ou en ensilage. Il offre un rendement exceptionnellement élevé en fourrage et une croissance rapide même à basse température. Toutefois, il est moins persistant que le ray-grass anglais, nécessitant souvent un renouvellement fréquent.

2.3.1.3 Fétuque (*Festuca spp.*)

La fétuque élevée (*Festuca arundinacea*) est une graminée vivace largement cultivée pour son adaptation aux sols humides et sa tolérance à la sécheresse. Elle est également résistante aux maladies et peut supporter un pâturage intensif. Ses principaux avantages incluent une bonne production de fourrage même en conditions difficiles et une adaptation à une large gamme de sols et de climats. Sa persistance en fait un choix idéal pour les prairies permanentes. Toutefois, elle peut présenter une palatabilité moindre par rapport à d'autres graminées, surtout si elle n'est pas bien gérée.

La fétuque rouge (*Festuca rubra*), bien que moins productive que la fétuque élevée, est très résistante au froid et adaptée aux zones à faible fertilité. Elle est souvent utilisée dans les mélanges pour améliorer la résilience des prairies. Ses avantages comprennent une excellente tolérance au froid et aux sols acides, ainsi qu'une bonne adaptation aux pâturages extensifs. Cependant, son rendement fourrager plus faible limite son utilisation en monoculture.

2.3.1.4 Dactyle (*Dactylis glomerata*)

Le dactyle, également connu sous le nom d'ivraie, est une graminée vivace qui se caractérise par sa croissance rapide au printemps et sa capacité à produire plusieurs coupes de foin par an. Il est particulièrement apprécié dans les systèmes de pâturage mixte.

Le dactyle présente une bonne résistance à la sécheresse et aux périodes de froid. De plus, il est très appétant pour les animaux et se marie bien avec des légumineuses telles que le trèfle dans les mélanges.

Cependant, il peut devenir envahissant si ce n'est pas bien géré et nécessite une gestion attentive pour éviter une perte de qualité du fourrage.

2.3.1.5 Maïs fourrager (*Zea mays*)

Le maïs fourrager est une culture annuelle très productive, principalement utilisée pour l'ensilage. Il est cultivé pour son rendement élevé en matière sèche et en énergie, ce qui le rend particulièrement adapté pour l'ensilage destiné à l'alimentation hivernale des ruminants.

Le maïs fourrager se distingue par sa production élevée en glucides, ce qui en fait un excellent choix pour l'ensilage. Il est également bien adapté à une grande variété de climats, surtout dans les régions chaudes.

En revanche, le maïs fourrager présente des inconvénients notables. Il nécessite des apports importants en eau et en nutriments, et requiert une gestion attentive des maladies et des ravageurs pour garantir une production optimale.

2.3.1.6 Sorgho (*Sorghum spp.*)

Le sorgho est une alternative au maïs dans les régions arides en raison de sa grande tolérance à la chaleur et à la sécheresse. Il est souvent utilisé pour l'ensilage ou comme pâturage d'été.

Parmi ses avantages, le sorgho se distingue par son excellente résistance à la sécheresse et à la chaleur, ce qui le rend adapté aux zones avec une disponibilité en eau limitée. Il peut également être cultivé sur des sols marginalement fertiles.

Cependant, le sorgho présente certains inconvénients. Il est généralement moins appétant que le maïs, et certains cultivars peuvent contenir des composés toxiques, tels que le prussique, qui nécessitent une gestion prudente.

2.3.2 Légumineuses fourragères

2.3.2.1 Luzerne (*Medicago sativa*)

La luzerne est l'une des légumineuses fourragères les plus importantes au monde en raison de sa richesse exceptionnelle en protéines et en minéraux. Elle constitue un excellent complément pour les ruminants, notamment pour la production laitière, en fournissant une alimentation nutritive et équilibrée.

Parmi les avantages de la luzerne, on trouve sa capacité à fixer l'azote atmosphérique, ce qui réduit le besoin en engrais azotés et contribue à une gestion plus durable des sols. De plus, sa tolérance à la sécheresse, attribuée à son système racinaire profond, permet une production de fourrage même en conditions sèches. La luzerne offre également la possibilité de réaliser plusieurs coupes de foin par an, augmentant ainsi la flexibilité de la gestion du fourrage.

Cependant, la luzerne présente certains inconvénients. Elle est sensible à l'acidification du sol, ce qui nécessite une gestion rigoureuse de la fertilisation et des rotations pour maintenir un pH de sol optimal. De plus, elle peut être sujette à des maladies spécifiques, telles que la pourriture des racines, nécessitant une surveillance attentive et des pratiques de gestion appropriées pour éviter les pertes de rendement.

2.3.2.2 Trèfle (*Trifolium spp.*)

Le trèfle blanc (*Trifolium repens*) est une légumineuse vivace largement utilisée dans les prairies temporaires et permanentes. Il se propage facilement et joue un rôle crucial dans l'amélioration de la qualité du sol grâce à sa capacité à fixer l'azote atmosphérique.

Parmi les avantages du trèfle blanc, on note son effet positif sur la fertilité du sol, sa croissance rapide, et son excellente résistance au pâturage. Sa teneur élevée en protéines en fait un choix de fourrage de qualité, idéal pour les systèmes de pâturage et de fauche.

Cependant, le trèfle blanc peut devenir envahissant et difficile à gérer si les conditions sont trop favorables, nécessitant une gestion attentive pour éviter des problèmes d'excès de croissance et de compétition avec d'autres plantes.

Le trèfle violet (*Trifolium pratense*) est souvent utilisé en rotation avec d'autres cultures ou en association avec des graminées. Il est particulièrement adapté à la production de foin en raison de sa haute valeur nutritive.

Ses principaux avantages incluent une richesse en protéines et en minéraux, ainsi qu'une bonne tolérance aux sols acides et aux climats tempérés. Cependant, le trèfle violet est moins persistant que le trèfle blanc, nécessitant donc un renouvellement plus fréquent pour maintenir sa présence dans les prairies.

2.3.2.3 Lotier corniculé (*Lotus corniculatus*)

Le lotier corniculé est une légumineuse vivace qui trouve sa place dans des sols pauvres, acides, ou mal drainés. Il est couramment utilisé pour le pâturage et le foin, en particulier dans les régions où d'autres légumineuses pourraient être moins performantes.

Parmi ses avantages, le lotier corniculé se distingue par sa tolérance aux conditions difficiles, ce qui en fait une option précieuse pour des sols de qualité inférieure. De plus, il présente un faible risque de météorisation (gonflement) chez les ruminants lorsqu'il est consommé frais. Il contribue également à l'amélioration de la structure du sol, ce qui est bénéfique pour la gestion des sols pauvres.

Cependant, le lotier corniculé a un rendement généralement plus faible comparé à d'autres légumineuses telles que la luzerne ou le trèfle. Pour optimiser la production de fourrage, il peut être nécessaire de l'associer à d'autres plantes, ce qui peut compliquer la gestion des cultures.

2.3.2.4 Sainfoin (*Onobrychis viciifolia*)

Le sainfoin est une légumineuse vivace couramment cultivée dans les sols calcaires ou secs. Il est réputé pour sa capacité à améliorer la digestion chez les ruminants et à prévenir les gonflements.

Parmi ses avantages, le sainfoin se distingue par son excellente tolérance à la sécheresse. Il est riche en protéines et en tanins condensés, ce qui non seulement améliore la santé digestive des animaux, mais contribue également à réduire la dépendance aux médicaments antiparasitaires. Ces caractéristiques en font une option précieuse pour les systèmes de pâturage et de fauche, particulièrement dans les environnements secs.

Cependant, le sainfoin présente certains inconvénients. Il est généralement moins productif que la luzerne, ce qui peut limiter son rendement en fourrage. De plus, sa culture nécessite des sols bien drainés, ce qui peut restreindre son utilisation dans des conditions de sol moins favorables.

2.3.3 Autres Cultures Fourragères

2.3.3.1 Betterave fourragère (*Beta vulgaris*)

La betterave fourragère est une culture bisannuelle renommée pour son rendement élevé en racines riches en sucre. Elle est souvent intégrée dans la ration alimentaire des bovins laitiers pour augmenter la production de lait, en raison de sa capacité à fournir une source importante d'énergie.

La betterave fourragère se distingue par sa richesse exceptionnelle en énergie, ce qui favorise la production laitière et contribue à une meilleure performance des animaux. Elle peut également être stockée pour une utilisation durant l'hiver, offrant ainsi une solution de fourrage nutritif pendant les mois où les ressources alimentaires sont plus limitées. De plus, elle est bien adaptée aux climats tempérés, ce qui permet sa culture dans diverses régions.

La culture de la betterave fourragère présente certains inconvénients. Elle exige des sols bien drainés et riches en nutriments pour optimiser sa croissance et son rendement. En outre, la récolte des betteraves nécessite un important travail de main-d'œuvre, ce qui peut représenter un coût supplémentaire et un défi pour la gestion des exploitations agricoles.

2.3.3.2 Chou fourrager (*Brassica oleracea* var. *acephala*)

Le chou fourrager est une culture particulièrement appréciée pour sa capacité à produire du fourrage vert pendant l'hiver, offrant ainsi une alimentation de secours lorsque les autres sources de fourrage sont rares. Cette plante est particulièrement utile pour maintenir une alimentation continue des animaux pendant les mois froids.

Le chou fourrager se distingue par sa grande résistance au froid, lui permettant de croître et de fournir un fourrage riche en protéines même en hiver. Il est souvent utilisé pour le pâturage d'hiver, et peut être complété avec d'autres types de fourrage pour offrir une ration équilibrée aux animaux. Cette capacité à produire du fourrage en période de pénurie fait du chou fourrager une option précieuse pour les exploitations agricoles.

Cependant, le chou fourrager présente certains inconvénients. Il nécessite un sol bien préparé et fertilisé pour assurer une croissance optimale et un rendement de qualité. De plus, il peut être sujet à des maladies spécifiques telles que l'oïdium, ce qui requiert une gestion attentive et des pratiques de prévention pour éviter des pertes de production.

2.3.4 Cultures Associées

2.3.4.1 Mélange de ray-grass et trèfle

Ce mélange est fréquemment utilisé pour créer des prairies riches en nutriments et résistantes. Le ray-grass fournit l'énergie sous forme de glucides, tandis que le trèfle apporte des protéines et enrichit le sol en azote.

Avantages : Améliore la structure du sol, réduit le besoin en engrais azotés grâce à la fixation de l'azote par le trèfle. Le mélange favorise également la biodiversité dans les prairies.

Inconvénients : Peut nécessiter une gestion plus complexe pour équilibrer la dominance de chaque espèce selon les conditions du sol et du climat.

2.3.4.2 Mélange de luzerne et dactyle

Ce mélange est utilisé pour optimiser la production de fourrage de haute qualité. La luzerne apporte des protéines, tandis que le dactyle fournit une structure et une énergie plus stable.

Avantages : Rendement élevé en fourrage de qualité, bonne tolérance aux conditions sèches et froides, et une synergie entre la persistance du dactyle et la valeur nutritive de la luzerne.

Inconvénients : Nécessite une bonne gestion des rotations pour éviter l'épuisement du sol et le risque de maladies.

2.4 Assolement fourrager

L'assolement fourrager consiste en la planification et l'organisation des rotations de cultures fourragères sur une exploitation agricole sur plusieurs années. Cette technique a pour objectif d'optimiser la production de fourrage tout en préservant la fertilité des sols, en limitant les maladies et les parasites, et en garantissant une alimentation équilibrée pour les animaux d'élevage.

Le principe de la rotation des cultures repose sur l'alternance de différentes cultures (graminées, légumineuses, céréales, etc.) sur une même parcelle au fil des ans. Cette pratique permet de prévenir l'épuisement des sols en nutriments, de réduire les pressions des ravageurs et des maladies, et d'améliorer la structure du sol. Parmi les bénéfices notables, on trouve la réduction des besoins en engrais chimiques, grâce à l'apport d'azote par les légumineuses, l'amélioration de la structure du sol et de sa capacité de rétention d'eau, ainsi que la diminution des infestations de mauvaises herbes, maladies et parasites spécifiques à certaines cultures.

La sélection des espèces fourragères doit être adaptée aux caractéristiques du sol (pH, texture, humidité), au climat (pluviométrie, température), et aux besoins nutritionnels des animaux. Par exemple, la luzerne est bien adaptée aux sols bien drainés et aux climats tempérés, tandis que le sorgho est particulièrement résistant à la sécheresse. Ce choix stratégique contribue à maximiser l'efficacité des rotations et à maintenir la durabilité des systèmes de production fourragère.

2.4.1 Systèmes de rotation typiques

Rotation Triennale : Un assolement sur trois ans pourrait inclure une première année de culture de luzerne ou de trèfle (légumineuses), suivie d'une culture de maïs fourrager, puis d'une année de prairie temporaire avec une combinaison de graminées et légumineuses.

Rotation Quadriennale : Un cycle de quatre ans pourrait commencer par une culture céréalière (par exemple, l'avoine), suivie par une année de culture de légumineuses (comme le trèfle), une troisième année avec une culture de graminées (comme le dactyle ou la fétuque), et une quatrième année de repos ou de culture de couverture.

2.4.2 Pratiques associées à l'assolement

Intégration des cultures de couverture : En dehors des cultures principales, des cultures de couverture (comme le seigle ou le radis fourrager) peuvent être semées pour protéger le sol de l'érosion, fixer l'azote, et améliorer la matière organique du sol.

Gestion de la fertilité : L'alternance entre cultures épuisantes pour le sol et cultures améliorantes (légumineuses fixatrices d'azote) permet de maintenir la fertilité du sol de manière durable, réduisant ainsi la dépendance aux fertilisants externes.

Prise en Compte du Calendrier de Pâturage : Dans les systèmes de pâturage, l'assolement doit aussi tenir compte des périodes de pâturage des animaux pour éviter le surpâturage et permettre la régénération des prairies.

2.4.3 Exemples d'assolement fourrager

Système à base de luzerne : Une rotation pourrait inclure trois années consécutives de luzerne, suivies par une année de maïs ou d'une autre culture céréalière.

Système Maïs-Soja : Un exemple commun aux États-Unis consiste en une rotation biennale maïs-soja, où le soja enrichit le sol en azote, préparant le terrain pour une culture intensive de maïs l'année suivante.

Système prairie permanente : Dans certaines régions, un système d'assolement peut inclure une longue période de prairies permanentes, interrompue périodiquement par des cultures de renouvellement pour revigorer la productivité.

2.5 Différents modes d'exploitation des fourrages

Les animaux peuvent pâturer (herbe, feuilles d'arbre) directement au pâturage, ou consommer des fourrages coupés, soit distribués frais à l'auge immédiatement après la coupe (affouragement en vert ou zéro pâturage), ou conservés et distribués sous forme essentiellement de foin ou d'ensilage. Le choix des différentes formes d'utilisation dépend du climat, des sols, des espèces cultivées, des espèces animales et du système de production (type de production, taille de l'exploitation, capacité technique, moyens financiers).

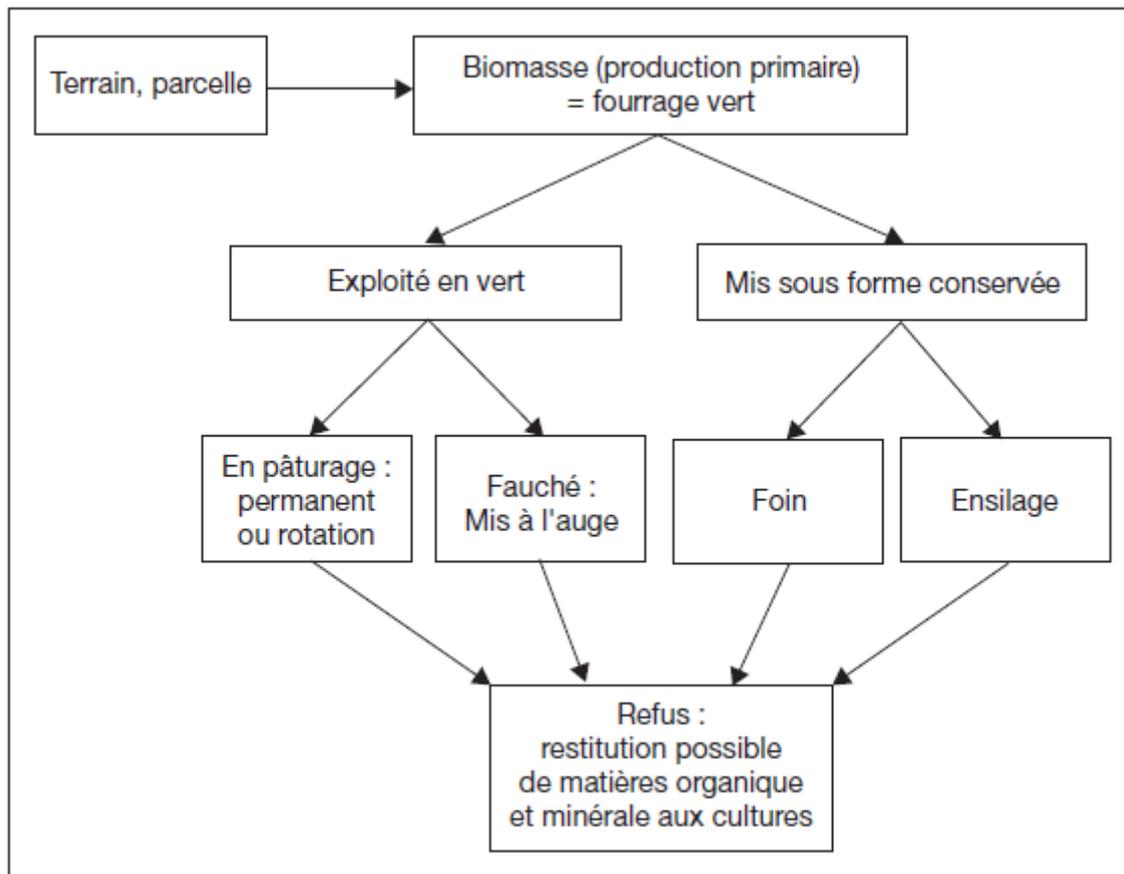


Figure 1: Différents modes d'exploitation des plantes fourragères.

2.6 Procédés de conservation des fourrages (foin, déshydratation, ensilage)

Les fourrages non pâturés et non distribués en l'état à la fauche (fourrages verts) sont conservés selon plusieurs méthodes

2.6.1 Conservation par voie sèche

Une humidité maximale de 16% est souhaitable pour assurer la stabilité d'une masse d'aliments stockés, la conservation par voie sèche est une méthode de dessiccation des tissus végétaux qui constituent les fourrages. Elle comprend 2 procédés : le Fanage ou fenaison naturelle, la déshydratation.

2.6.1.1 Fanage

Le fanage consiste à baisser rapidement la teneur en eau du fourrage en-dessous de 15 %, ce qui stoppe toute dégradation. Plus rapide sera le fanage, mieux seront conservés les constituants nutritifs. Est un travail agricole qui consiste à retourner l'herbe fraîchement fauchée de façon à en faire du foin, en le faisant sécher au soleil avant de le presser ou botteier pour le stocker.

Le fanage se fait très souvent au champ. Pour y parvenir, les conditions atmosphériques doivent être favorables : temps chaud et sec, soleil, vent léger. Chaque incident en cours de fanage, pluie, absence de soleil, forte humidité de l'air, vent trop fort, occasionne des pertes.

La qualité du foin dépend de la qualité du fourrage au moment de la coupe, de la qualité du séchage et des conditions de stockage. Les critères les plus pertinents de qualité sont la valeur alimentaire et les performances animales. Un bon foin s'apprécie à son degré de siccité, à sa composition botanique et à ses valeurs énergétique et azotée (qualité et quantité des espèces récoltées, pourcentage de légumineuses, présence ou non de mauvaises herbes), à sa couleur encore verte, à sa texture souple grâce à une proportion importante de feuilles

2.6.1.2 Déshydratation

Cette technique est appliquée à d'excellents fourrages, en particulier la luzerne, et à des aliments très aqueux comme les pulpes de betteraves. Elle peut aussi être utilisée pour des fourrages fauchés tôt au printemps, des repousses d'automne, ou du maïs.

Le fourrage vert est haché puis desséché rapidement en le soumettant à de fortes températures (près de 100°C), pendant un temps variant de trente secondes à trois minutes. Après la déshydratation, le produit est soumis à la granulation. Ce conditionnement permet de limiter les pertes et facilite la manutention et le stockage.

Compte tenu de la dépense énergétique, cette technique est coûteuse mais elle est séduisante, car elle permet de conserver la qualité originelle du fourrage vert.

2.6.2 Conservation par voie humide : Ensilage et Enrubannage

2.6.2.1 Ensilage

L'ensilage est une technique de conservation des fourrages humides, permettant de préserver la qualité du produit proche de celle du fourrage avant la fauche. Cette conservation est obtenue par une acidification contrôlée en conditions anaérobies (en absence d'air). Le processus repose sur la transformation des sucres solubles du fourrage en acide lactique grâce à l'action d'enzymes et de micro-organismes, principalement des bactéries lactiques. Ces bactéries fermentent les glucides présents, produisant de l'acide lactique, qui abaisse le pH du fourrage, inhibant ainsi le développement d'autres micro-organismes indésirables. La stabilisation de l'aliment est ainsi assurée lorsque le pH atteint une valeur inférieure ou égale à 4, garantissant une bonne conservation.

Pour améliorer ce processus de fermentation, il est possible d'inoculer le fourrage avec des bactéries sélectionnées au moment du remplissage du silo. Si la teneur en sucres solubles est insuffisante pour assurer une fermentation adéquate, on peut augmenter artificiellement l'acidification en ajoutant de petites quantités d'acides formiques du commerce.

L'ensilage est moins tributaire des conditions climatiques, telles que les pluies, que le fanage. Cependant, cette technique exige un investissement important en matériel, en main-d'œuvre, et nécessite une forte technicité pour réussir. Les conditions suivantes doivent être réunies pour garantir un ensilage de qualité :

- Taux de matière sèche élevé : Idéalement autour de 35 %. Un taux inférieur peut entraîner la production de jus d'ensilage, représentant des pertes nutritives.
- Teneur en sucres fermentescibles suffisante : Essentielle pour assurer une bonne fermentation.
- Production de fourrage dense et abondante : Nécessaire pour limiter les coûts de récolte et assurer un remplissage efficace du silo. Pour les céréales, la densité de peuplement doit être supérieure à celle utilisée pour la production de grains.
- Respect des contraintes de mise en silo : Incluant le tassage du fourrage et une enveloppe bien hermétique pour maintenir des conditions d'anaérobiose.

2.6.2.2 Enrubannage

L'enrubannage est une autre méthode de conservation du fourrage qui, comme l'ensilage, repose sur la fermentation des glucides par des bactéries anaérobies, notamment les bactéries lactiques. Cependant, l'enrubannage diffère par la technique de stockage et le niveau d'humidité du fourrage.

Le fourrage destiné à l'enrubannage est légèrement plus sec que celui utilisé pour l'ensilage, avec une teneur en matière sèche de 40 à 60 %. Après la coupe et un léger séchage, le fourrage est enroulé en balles, généralement rondes ou rectangulaires, puis enveloppé dans plusieurs couches de film plastique étanche. Cette enveloppe crée un environnement anaérobie autour de chaque balle, permettant une fermentation plus douce que celle de l'ensilage.

Contrairement à l'ensilage qui est stocké en vrac dans des silos, l'enrubannage permet de conserver le fourrage en balles individuelles. Ces balles sont faciles à manipuler, transporter, et stocker, souvent en extérieur, grâce à la protection offerte par le plastique. L'enrubannage assure une bonne conservation du fourrage avec un risque moindre de moisissure, surtout si le fourrage est de bonne qualité au départ. Cette méthode est particulièrement adaptée aux petites et

moyennes quantités de fourrage, ou dans des contextes où les conditions climatiques ne permettent pas un séchage complet pour la production de foin.

2.7 Bilan fourrager

2.7.1 Définition

Le bilan fourrager est un outil essentiel pour les exploitations agricoles qui élèvent des animaux. Il permet d'évaluer la disponibilité des ressources fourragères par rapport aux besoins alimentaires des animaux tout au long de l'année. Ce bilan permet de prévenir les pénuries de fourrage, d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles et de planifier les achats ou la production de fourrage supplémentaire si nécessaire.

Le bilan fourrager consiste à prévoir les besoins en fourrages du troupeau sur une période choisie (hiver, année entière...) et à les comparer aux stocks disponibles. Il répond aux questions suivantes :

- Quel type de fourrage peut venir à manquer ?
- Pour quelle(s) catégorie d'animaux ?
- A quelle période et en quelle quantité ?

2.7.2 Etapes de réaliser un bilan fourrager

❖ Evaluer les besoins des animaux en fourrages : Les besoins des animaux sont évalués à partir du nombre d'animaux par catégorie, des rations journalières et de la durée des périodes à prendre en compte

❖ Estimer les stocks fourragers : Dans le cas où des achats de fourrages sont inévitables, on a intérêt à évaluer les stocks le plus précisément possible. L'estimation des stocks se fait en matière sèche car c'est le seul moyen fiable pour les comparer à la consommation des animaux. Pour l'ensilage, il faut calculer le volume des silos en définissant une hauteur, une largeur et une longueur moyenne. Pour les fourrages pressés, il faut faire l'inventaire des bottes d'enrubannage, de foin et de paille présentes. Pour le foin et la paille, on peut prendre des normes (85% MS et 90% de MS).

❖ Comparer les besoins et les stocks : La confrontation des besoins et des stocks permet de déterminer la nature et la quantité des fourrages à trouver en dehors de l'exploitation. Si les stocks fourragers couvrent au moins 80% des besoins, l'achat de fourrages n'est pas forcément obligatoire. Si les stocks couvrent moins de 80% des besoins, l'achat de fourrages ou d'aliments de substitution sera indispensable.

❖ Calcul du bilan fourrager : Le bilan fourrager est calculé par la différence entre les stocks de fourrages et les besoins des animaux calculés. S’il est négatif, il faut choisir une ou des stratégies qui permettront de nourrir convenablement les animaux jusqu’à ce que d’autres fourrages soient disponibles.

3. Constituants des aliments

Tous les aliments sont constitués des mêmes composants : eau, matières minérales, glucides, lipides et matières azotés. Par dessiccation de l'aliment, on obtient un résidu sec appelé matière sèche (MS).

$$\text{Quantité d'eau évaporée} = \text{masse avant dessiccation} - \text{MS}$$

La matière sèche calcinée laisse un résidu appelé cendres ou matières minérales (MM) : la masse qui disparaît lors de la calcination est appelée matière organique (MO). On calcule :

$$\text{MO} = \text{MS} - \text{MM}$$

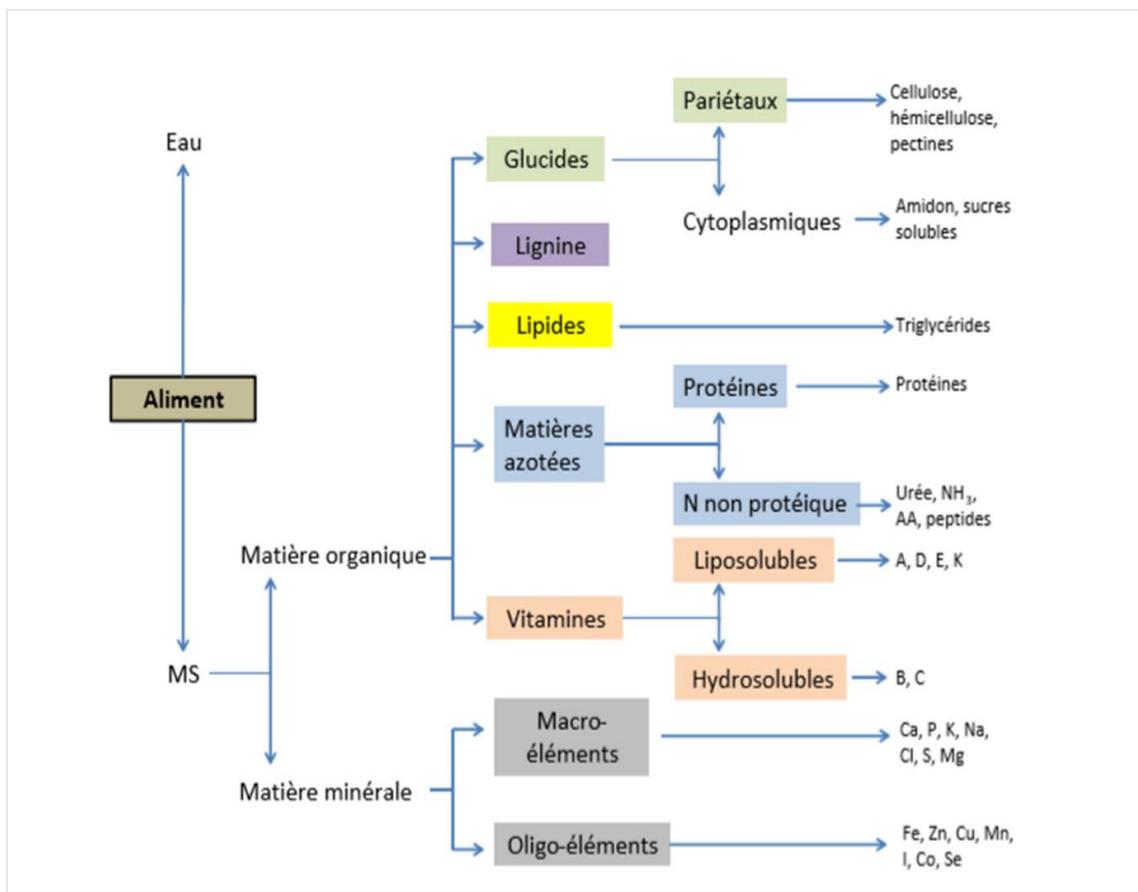


Figure 2: Constituants des aliments

3.1. Eau

L'eau est le constituant le plus abondant de l'organisme. Celle-ci forme plus de 80% du poids de la matière végétale ; on y trouve deux types d'eaux, l'eau dissoute dont laquelle se trouve les substances hydrosolubles (protides, glucides, minéraux, vitamines et gaz), et l'eau fixe non mesurable. La première a un rôle fonctionnel et la deuxième un rôle plastique.

3.2. Matière organique

Caractérisée par la présence de carbone, associée à l'hydrogène, à l'oxygène, parfois à l'azote et à de petites quantités de phosphore et de soufre. Les composants de la matière organique sont des glucides, des lipides et des matières azotées.

La connaissance de la composition en constituants organiques d'un aliment et de leur devenir dans le tube digestif de l'animal est à la base de l'expression de sa valeur nutritive.

3.2.1. Glucides et Lignine

On peut distinguer 2 catégories de glucides :

- Les glucides constituant la paroi des cellules végétales, les glucides pariétaux (appelé communément « les fibres »), qui comprennent la cellulose, l'hémicellulose et les pectines ;
- Les glucides contenus à l'intérieur des cellules végétales, les glucides cytoplasmiques, qui comprennent l'amidon et les sucres solubles (glucose, lactose,...).

La paroi des cellules végétales comprend également un composé non glucidique, la lignine. Cette substance, qui s'associe aux glucides pariétaux et dont la teneur augmente avec l'âge de la plante, est presque totalement non dégradable dans le tube digestif du ruminant.

Tableau 1: Principaux glucides cytoplasmiques et constituants pariétaux d'une cellule végétale.

Localisation	Dénomination		Unités constitutives
Contenu cellulaire	Sucres libres	Glucose Fructose Saccharose Mélitiose	Glucose, Fructose Glucose, Galactose
	Polyosides de réserve	Fructosanes Amidon	Fructose Glucose
Parois	Polyosides	Cellulose	Glucose
		Hémicellulose	Xylose, Arabinose, Galactose, Mannose, Glucose, Acide glucuronique
	Substances pectiques		Acide galacturonique, Arabinose, Galactose
	Substances non glucidiques	Lignine	Alcool coumarylique Alcool coniférylique Alcool synapylique
	Cires (cutine)		Alcools et acides gras à longue chaîne

3.2.1.1.Lignine

La paroi des cellules végétales comprend également un composé non glucidique, la lignine. Cette substance, qui s'associe aux glucides pariétaux et dont la teneur augmente avec l'âge de la plante, est presque totalement non dégradable dans le tube digestif du ruminant.

Substance de structure polyphénolique (formées d'alcools), incruste la cellulose et l'hémicellulose et rend les polysides pariétaux inaccessibles à l'action microbienne. Elle joue un grand rôle en limitant la digestibilité à la fois des glucides et des autres nutriments. Sa teneur varie de 2% dans l'herbe jeune à 12-13 % de la MS dans la paille.

Les lignines (du latin lignum qui signifie bois), sont des polyphénols, tridimensionnelles hydrophobes de haut poids moléculaire. Leur structure résulte de la copolymérisation de trois monomères aromatiques de type phénylpropène : l'alcool coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique. A la fin du développement cellulaire, la lignine incruste ainsi la cellulose et les hémicelluloses, ce qui assure la rigidité de la paroi.

3.2.1.2.Glucides cytoplasmiques

Ils sont contenus à l'intérieur de la cellule végétale. Ce sont des substrats ou des intermédiaires du métabolisme cellulaire des glucides, et des glucides de réserve. Les glucides cytoplasmiques comprennent donc : Les glucides hydrosolubles et Les polyholosides de réserve (amidon)

a. Glucides hydrosolubles

Les glucides hydrosolubles (fructose, saccharose, glucose) de digestibilité totale, ils représentent en général moins de 10% de la matière sèche des aliments d'origine végétale. Quelques graminées jeunes, des betteraves et des mélasses ont beaucoup plus riches, leur concentration maximale est atteinte avant le début de l'épiaison des graminées et peu avant le début du bourgeonnement des légumineuses.

b. Polyholosides de réserve (amidon)

Le glucose produit lors de la photosynthèse peut être transformé en amidon. C'est sous cette forme qu'il est stocké dans le chloroplaste. Les amidons sont mis en réserve dans les plastes des cellules végétales et peuvent présenter jusqu'à 30 ou 60 % du poids sec d'un tissu végétal. Chez l'animal, l'amidon est hydrolysé par une amylase.

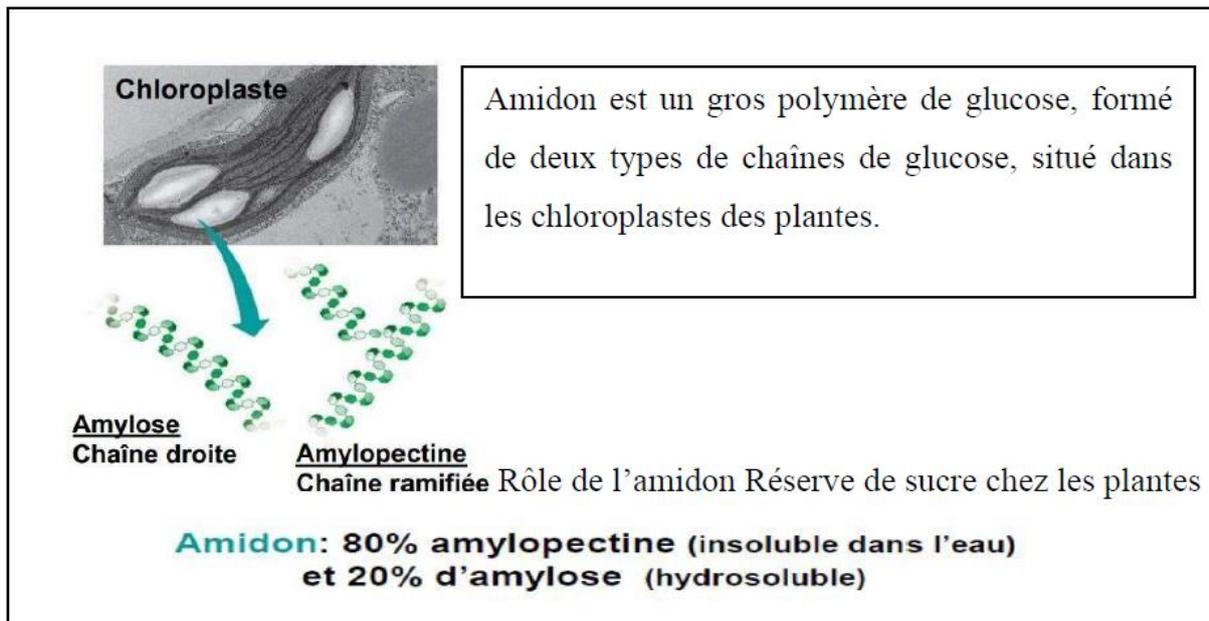


Figure 3: Amidon sucre de réserve chez les plantes

3.2.1.3. Glucides pariétaux

Les glucides pariétaux sont les constituants des parois cellulaires. On distingue les glucides proprement dit (polyosides) et les constituants non glucidiques qui leur sont associés (lignine). On dénombre 3 groupes de polyosides : la cellulose, l'hémicellulose et les substances pectiques.

a. Cellulose

C'est la principale molécule structurelle des plantes. C'est un polyholoside homogène de glucose (un polymère de glucose). De structure fibreuse, elle est constituée de longues chaînes de molécules de D-glucose, reliées les unes aux autres par des liaisons β -1,4-glucosidiques. La réunion de plusieurs de ces macromolécules linéaires, parallèles, forme une fibrille, ou micelle, dont la cohésion est assurée par les liaisons hydrogènes qui s'établissent d'une macromolécule à une autre, à partir des groupements hydroxyyles. La réunion de ces fibrilles constitue les fibres, forme sous laquelle se présente la cellulose. Son aspect varie avec la plante, sa maturité et l'organe considéré.

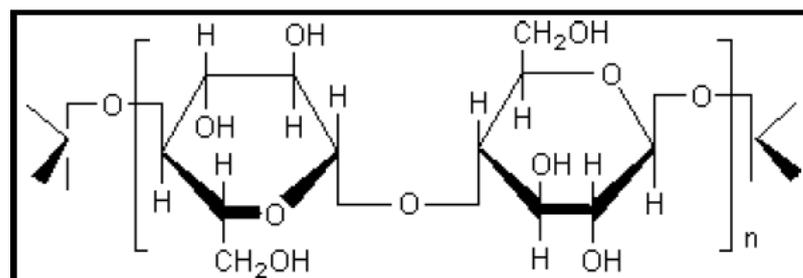


Figure 4: Structure chimique de la cellulose

La cellulose est une molécule très longue et rigide de formule $(C_6H_{10}O_5)_n$ (n compris entre 200 et 3000). Elle est formée de longues chaînes de molécules de glucose de B-D glucopyranose toutes reliées entre elles par des liaisons hydrogène (liaisons faibles) et dont les liaisons osidiques ne peuvent être rompues, au cours de la digestion, que par les enzymes bactériennes. La cellulose est le principal constituant de la paroi secondaire des cellules végétales, des tissus de soutien (collenchyme, sclérenchyme) et des vaisseaux du bois ou conducteur (xylème).

La cellulose ne peut être assimilée par l'être humain mais sa présence dans l'alimentation favorise le transit intestinal et protège l'organisme contre le cancer du côlon.

Les animaux herbivores utilisent en général des enzymes d'origine exogène, c'est-à-dire produites par les cellules de la flore intestinale pour digérer la cellulose.

b. Hémicelluloses

Les hémicelluloses représentent, après la cellulose, le polysaccharide le plus abondant dans la nature. Elle constitue 30 à 45 % de la biomasse végétale terrestre formée essentiellement de chaînes de pentoses, qui sont les principaux constituants de la paroi primaire des cellules végétales (xylose, de quelques hexoses et d'acides uroniques).

Elles sont souvent associées à la lignine et sont moins digestibles que la cellulose vraie. Plus la plante vieillit, plus la teneur en hémicellulose augmente.

Les hémicelluloses sont un groupe de polysaccharides complexes qui se caractérisent par leur extractibilité de la paroi par des solutions alcalines. Elles diffèrent de la cellulose de par l'hétérogénéité de leur composition monosaccharidique. En général elles sont constituées de chaînes moléculaires plus courtes avec un degré de polymérisation souvent inférieur à 200.

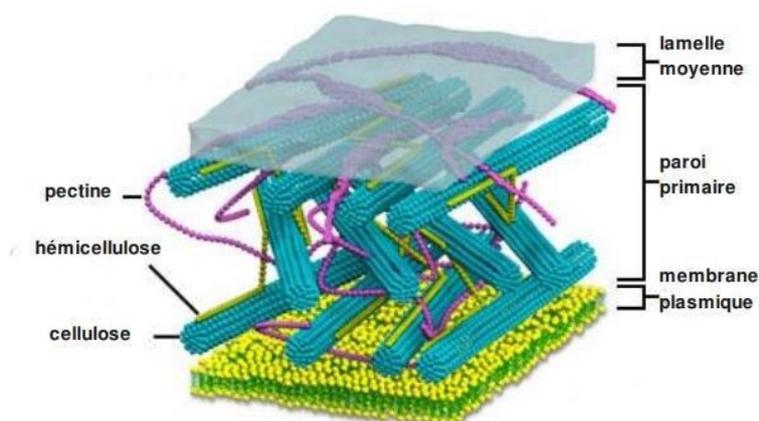


Figure 5: Modèle simplifié de la paroi primaire

c. Substances pectiques

Les pectines forment un groupe de polysaccharides complexes qui ont comme caractéristique d'être extraits de la paroi par de l'eau chaude, des acides dilués,... Ce sont les constituants essentiels de la lamelle moyenne à la base du « ciment » qui réunit les cellules entre elles. La structure principale des pectines est formée de chaînes faiblement polymérisées d'acides galacturoniques liés en α -(1→4), appelé acide poly galacturonique, sur lesquelles s'insèrent des résidus de L-rhamnose.

3.2.2. Lipides

Les lipides sont également appelés matières grasses. Il existe différentes classes de lipides. Les principaux constituants lipidiques des végétaux sont en général des triglycérides, c'est-à-dire des molécules comprenant 1 glycérol + 3 acides gras.

Les matières grasses sont caractérisées par la nature des acides gras qui les composent. Ainsi, on peut classer les acides gras selon leur longueur :

- Les acides gras volatils (AGV) avec 2, 3 ou 4 atomes de C
- Les acides gras à courte chaîne (entre 5 et 10 atomes de C)
- Les acides gras à chaîne moyenne (12 à 16 atomes de C)
- Les acides gras à longue chaîne (18 ou plus de 18 atomes de C)

On peut également les classer en fonction de la présence ou de l'absence de double liaison sur leur chaîne carbonée : les acides gras saturés d'une part (sans double liaison), les acides gras insaturés (avec 1 double liaison ou plus) et les acides gras polyinsaturés (avec plus de 1 double liaison ou plus).

Notons encore que certains acides gras sont considérés comme « essentiels » pour toutes les espèces animales. Ceci signifie qu'ils doivent impérativement être apportés par l'alimentation car l'animal ne peut les synthétiser. Ils peuvent par contre être synthétisés par les microorganismes hébergés dans leur tube digestif. Ainsi chez les ruminants, cette synthèse s'opérant dans le rumen, il n'est pas indispensable d'apporter ces acides gras dans leur alimentation.

3.2.3. Matières azotées

Les matières azotées sont représentées par des protéines et de l'azote non protéique. Une protéine est constituée d'une longue chaîne d'acides aminés (AA). En alimentation, 20 AA

différents sont pris en considération, dont pratiquement la moitié d'entre eux sont considérés comme essentiels car ne pouvant être synthétisés par l'animal. Ils doivent donc être impérativement présents dans les aliments consommés.

Le ruminant se distingue des autres espèces animales car une part substantielle des acides aminés digérés dans l'intestin a été synthétisée dans le rumen grâce aux microorganismes hébergés. L'azote non protéique comprend quant à lui notamment les peptides (chaînes d'AA limitées), les AA, l'urée et l'ammoniac (NH₃).

3.2.4. Vitamines

Les vitamines se définissent comme des constituants de la matière organique que l'animal est en général incapable de synthétiser, et qui, à faible dose, sont indispensables au développement, à l'entretien et aux fonctions de l'organisme. On distingue 2 catégories de vitamines :

- Les vitamines liposolubles, c'est-à-dire solubles dans les graisses : vitamines A, D, E et K
- Les vitamines hydrosolubles, c'est-à-dire solubles dans l'eau : vitamine C et vitamines du groupe B (B1 : thiamine ; B2 : riboflavine ; B3 : niacine ; B5: acide pantothénique ; B6: pyridoxamine ; B8 : biotine ; B9 : acide folique ; B12:cyanocobalamine).

Les vitamines liposolubles font l'objet d'un stockage au niveau du foie. Même s'il y a mise en réserve, il est certain qu'un apport régulier par l'alimentation permet à l'animal d'extérioriser son potentiel de production.

Chez le ruminant, il n'est pas nécessaire d'apporter via la ration alimentaire les vitamines du groupe B ainsi que les vitamines C et K. Les microorganismes du rumen sont en effet capables de les synthétiser. Les autres vitamines doivent par contre impérativement être apportées par les aliments distribués.

3.2.5. Matière minérale

La matière minérale, ou matière inorganique, correspond au résidu sec d'un aliment lorsque celui-ci a été calciné dans un four à 550°C. Ce résidu est également appelé cendres brutes ou cendres totales. Celles-ci comprennent les minéraux, que l'on peut diviser en 2 catégories :

- Les macro-éléments, présents en quantités relativement importantes et pour lesquels l'unité de mesure est le g. Ce sont ainsi le calcium (Ca), le phosphore (P), le potassium (K), le sodium (Na), le chlore (Cl), le soufre (S) et le magnésium (Mg).

○ Les oligo-éléments, présents en quantités très faibles ou à l'état de traces, pour lesquels l'unité de mesure est le mg. Ce sont le fer (Fe), le sélénium, (Se), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), l'iode (I), le cobalt (Co) et le manganèse (Mn).

4. Anatomie comparée de l'appareil digestif des polygastriques et des monogastriques herbivores et granivores.

4.1. Appareil digestif des animaux d'élevage (points communs et différences)

Destiné à transformer les aliments, inassimilables, en nutriments, source assimilable de matériaux de construction et d'énergie, l'appareil digestif comprend :

- a. La bouche et les dents
- b. Le tube digestif, avec ses 3 parties :
 - ❖ L'œsophage
 - ❖ L'estomac
 - ❖ Les intestins
- c. Les glandes digestives
 - ❖ Glandes salivaires, gastriques, intestinales
 - ❖ Foie et pancréas

Des différences existent dans l'anatomie de ces organes entre les différentes espèces animales. Comme ces différences ont souvent des conséquences importantes sur la technique d'alimentation

4.1.1. Bouche et les dents

4.1.1.1. Celle des bovins présente trois particularités

- Leur langue, très mobile, garnie d'une muqueuse sèche, permet la préhension des aliments ;
- Leur mufle, épais et rigide, n'est pratiquement pas mobile ;
- Leur mâchoire de ruminants est dépourvue d'incisives supérieures. Les 8 incisives inférieures s'affrontent avec un bourrelet cartilagineux, le coussinet dentaire.
- Leur formule dentaire : 0/8 incisives+0/0 canines+6/6 prémolaires+6/6 molaires

Ces particularités expliquent la manière de pâturer des bovins : ils attirent l'herbe d'un coup de langue, la pincent entre incisives et bourrelet, et l'arrachent d'un coup de tête plus qu'ils ne la coupent. Ils ne peuvent pâturer l'herbe plus ras que 2 cm.

4.1.1.2. Ovins et caprins ont la même dentition mais pâturent tout autrement :

- Leurs lèvres, très fines et mobiles, peuvent prendre les aliments ;

- Leurs incisives (inférieures seulement comme chez les bovins), très fines et coupantes, peuvent s'avancer très près du sol.
- Formule dentaire : 0/8 incisives+0/0 canines+6/6 prémolaires+6/6 molaires.

De ce fait, les moutons et les chèvres coupent l'herbe très ras, ce qui leur permet de tirer parti des pâturages pauvres, Mais ils risquent de les surpâturer. De plus, coupant l'herbe au collet, les moutons sont plus fréquemment parasités par les larves de douve qui vivent fixées à ce niveau.

4.1.1.3.Chevaux ont une dentition plus complète :

Les chevaux possèdent une dentition plus complète que celle de nombreux autres animaux de pâturage, ce qui leur confère une capacité particulière à exploiter divers types de fourrage. Leur formule dentaire comprend des incisives sur chaque mâchoire, avec des canines présentes uniquement chez les mâles. La formule dentaire des chevaux se compose de :

- Incisives : 6/6 (6 incisives sur la mâchoire supérieure et 6 sur la mâchoire inférieure)
- Canines : 1/1 (présentes uniquement chez les mâles)
- Prémolaires : 8/6 (8 prémolaires sur la mâchoire supérieure et 6 sur la mâchoire inférieure)
- Molaires : 6/6 (6 molaires sur chaque mâchoire)

Les lèvres des chevaux sont particulièrement mobiles et préhensives, ce qui leur permet de saisir et de manipuler l'herbe avec une grande précision. Cette préhension fine permet aux chevaux de pâturer l'herbe plus ras que les bovins, qui ont des lèvres moins mobiles. Les chevaux utilisent cette capacité pour extraire le fourrage disponible de manière efficace, même lorsqu'il est court ou difficile d'accès.

4.1.1.4.Lapins

La dentition des lapins est adaptée à leur régime alimentaire principalement herbivore, leur permettant de ronger et de consommer des matériaux végétaux variés. Leur formule dentaire est caractérisée par : Incisives : 4/2 ; Canines : 0/0 Prémolaires : 6/4 Molaires : 6/6

Les incisives des lapins sont particulièrement développées et adaptées à leur rôle dans la coupe et la mastication des aliments. En l'absence de canines, les incisives jouent un rôle central dans la gestion de leur alimentation. Les prémolaires et molaires, quant à elles, sont conçues pour broyer efficacement les fibres végétales et compléter le processus de digestion. Cette dentition est essentielle pour leur alimentation basée sur les matières végétales, leur permettant de ronger et de mastiquer des aliments tels que les herbes, les feuilles, et les racines.

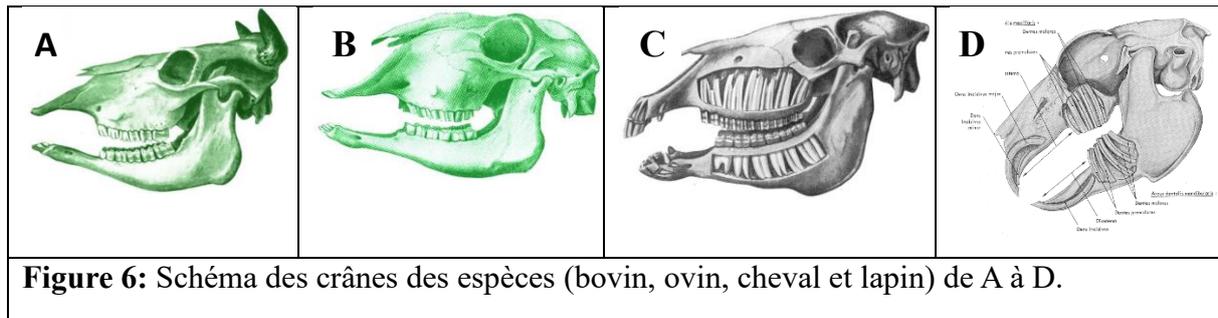


Figure 6: Schéma des crânes des espèces (bovin, ovin, cheval et lapin) de A à D.

4.1.2. Estomac

Premier réservoir digestif, l'estomac présente de telles différences suivant les espèces, qu'il sert de base à une classification des espèces domestiques :

- ✚ Les polygastriques (à "plusieurs estomacs") sont les herbivores ruminants : bovins, ovins, chèvres
- ✚ Les monogastriques (à "un seul estomac") sont soit des herbivores (cheval et lapin) soit des granivores (volailles).

4.1.2.1. Estomac des ruminants

Bien que les ruminants soient appelés "polygastriques", ils n'ont qu'un estomac composé de quatre poches : la panse ou rumen, le bonnet ou réseau, le feuillet ou omasum, et la caillette. Les trois premières poches sont appelées "pré-estomac", contrairement à l'estomac véritable, la caillette, qui est la seule à contenir des glandes gastriques.

a) Rumen, ou panse

- Occupe la partie gauche de l'abdomen,
- Représente 90 % du volume de l'estomac (soit 250 à 300 litres), ou encore 70 à 75 % du volume de l'appareil digestif
- Possède deux ouvertures : un orifice d'entrée, étroit mais très extensible, raccordé à l'œsophage, le cardia, un orifice de sortie, très large, entre la panse et le bonnet, le col de la panse.

Ces deux orifices sont reliés par un repli en forme de gouttière pouvant, en contractant ses bords, relier directement l'œsophage au feuillet, c'est la gouttière œsophagienne. Située dans la paroi du bonnet, elle est en quelque sorte le prolongement de l'œsophage jusqu'au feuillet, empêchant, dans certains cas, les aliments de tomber dans la panse.

La paroi du rumen est formée :

- D'une tunique musculaire qui constitue l'essentiel de sa masse. Ce sont les contractions de ces muscles qui assurent le brassage continu des aliments. Des piliers charnus partagent incomplètement le rumen en deux poches.
- D'une muqueuse tapissant l'intérieur. C'est un tissu riche en vaisseaux sanguins, ce qui montre que l'absorption par le sang au niveau du rumen sera possible. La muqueuse est garnie de papilles nombreuses qui augmentent la surface de contact avec les aliments.

b) Réseau ou bonnet, ou réticulum

Le bonnet, ou réseau, est situé en avant de la panse. Sa paroi intérieure est tapissée d'alvéoles qui ressemblent à des rayons d'abeilles. Ces alvéoles augmentent la surface de contact avec les aliments, facilitant ainsi leur traitement.

Contrairement au rumen, le bonnet ne possède pas de glandes digestives. Son rôle principal est celui d'un tri sélectif : il ne laisse passer vers le feuillet que les particules suffisamment divisées. Les particules plus grosses et moins dégradées sont retenues dans la panse, où elles subissent la rumination et la dégradation microbienne jusqu'à ce qu'elles soient suffisamment raffinées pour passer au stade suivant du processus digestif.

c) Feuillet ou omasum

Le feuillet, ou omasum, est plus volumineux que le réseau. Sa paroi intérieure est tapissée de très nombreuses lamelles muqueuses, disposées de manière similaire aux feuillets d'un livre, d'où il tire son nom. Ces lamelles sont alignées parallèlement au passage des aliments, formant une sorte de filtre. Ce filtre ne laisse passer que les aliments bien divisés, qui sont comprimés entre les lamelles. Cette disposition favorise une importante absorption de l'eau.

Contrairement au rumen et au bonnet, le feuillet ne possède aucune glande digestive.

d) Caillette

La caillette est le seul réservoir du système digestif des ruminants à posséder des glandes digestives. Elle constitue l'estomac proprement dit des ruminants, où se sécrète le suc gastrique. Chez le veau, elle produit également la présure.

La muqueuse interne de la caillette est garnie de nombreux replis, disposés comme des valvules à l'ouverture entre le feuillet et la caillette. Ces replis empêchent le reflux des aliments. Ils sont recouverts d'un mucus très acide, ce qui contribue à l'environnement acide nécessaire à la digestion.

L'absorption d'eau et d'éléments minéraux à travers la muqueuse des lamelles est particulièrement intense dans la caillette, favorisant l'absorption de ces substances essentielles pour le métabolisme.

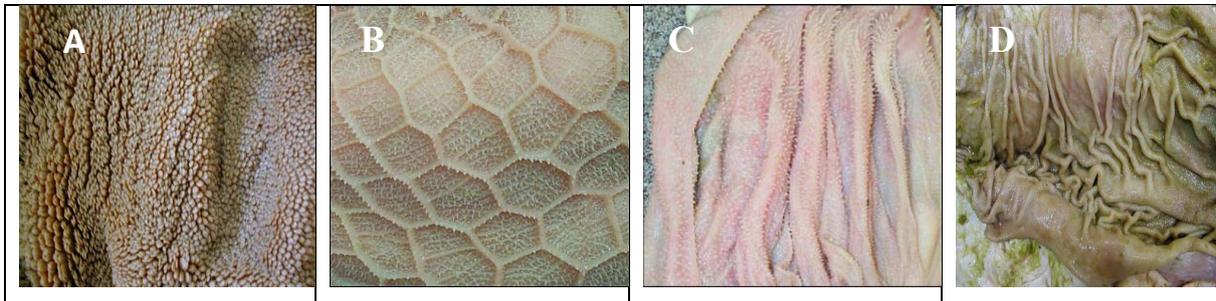


Figure 7: Paroi du rumen, du réseau, du feuillet et de la caillette, de A à D.

4.1.2.2. Estomac du veau et de l'agneau

Chez le veau et l'agneau, seule la caillette est vraiment développée. Les autres parties de l'estomac ne sont qu'ébauchées. La gouttière œsophagienne joue alors son rôle primordial : faire passer le lait directement dans la caillette, en court-circuitant le rumen.

L'évolution des réservoirs gastriques est illustrée par la figure, qui montre qu'à la naissance, le veau et l'agneau sont pratiquement des monogastriques.

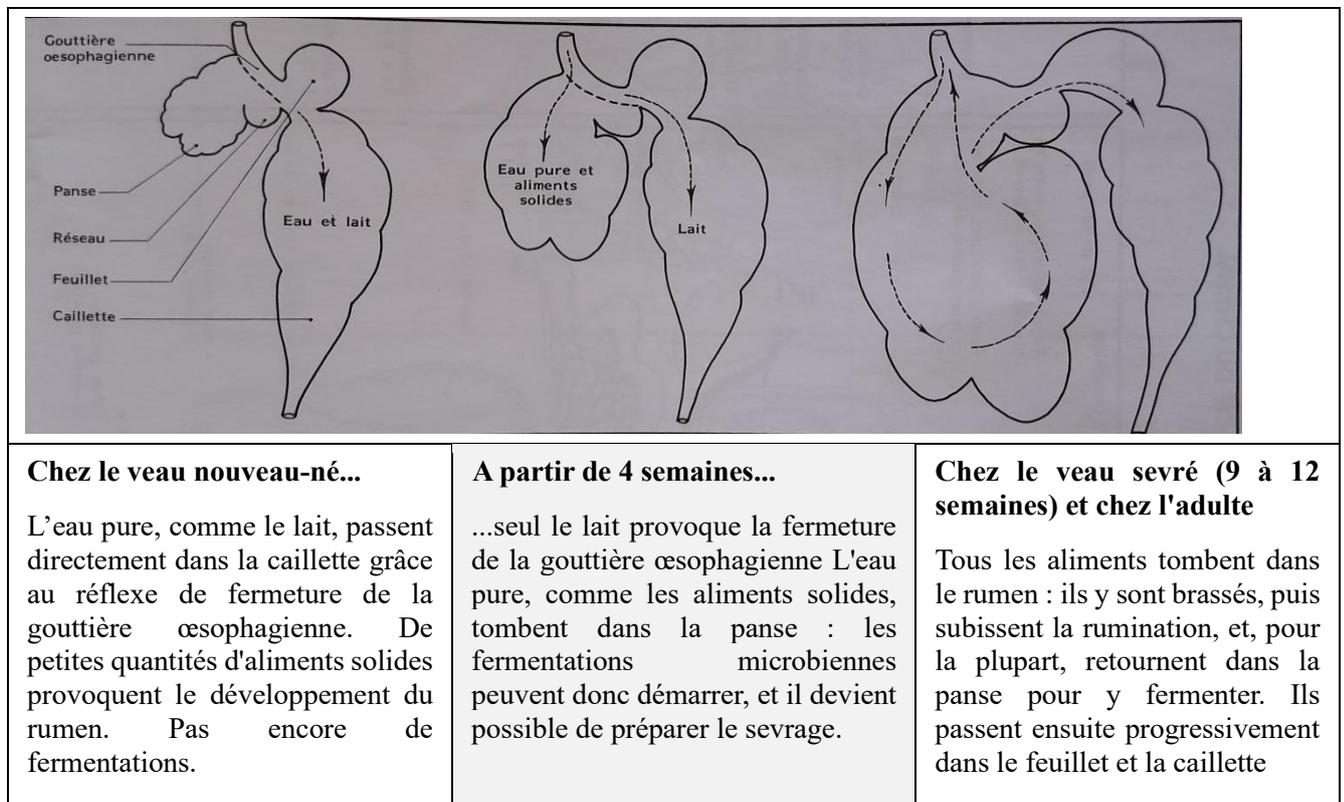


Figure 8: Evolution de l'estomac d'un veau d'élevage

4.1.2.3. Estomac du cheval

L'estomac du cheval, en forme de cornemuse et situé dans la partie droite de l'abdomen, est relativement petit, avec une capacité de seulement 15 à 18 litres. Sa taille réduite peut surprendre, surtout lorsqu'on considère le volume des aliments ingérés au cours d'un repas.

La muqueuse interne de l'estomac présente deux aspects distincts. Dans le cul-de-sac gauche, où les aliments arrivent en premier, la muqueuse est blanche et plissée, dépourvue de glandes digestives. Cette partie de l'estomac joue un rôle principalement passif dans la digestion.

En revanche, dans le cul-de-sac droit, la muqueuse prend une teinte rose et violacée, étant riche en glandes gastriques. Cette région est responsable de la sécrétion des enzymes digestives et de l'acide gastrique nécessaires à la dégradation des aliments.

Le cardia, la valve située à l'entrée de l'estomac, est très serré, empêchant le reflux des aliments et rendant le vomissement impossible chez le cheval. Cette caractéristique est liée à la structure particulière de l'estomac du cheval, qui n'est pas adapté au vomissement.

À l'opposé, le pylore, la valve située à la sortie de l'estomac, est largement ouvert. En conséquence, les aliments y restent peu de temps. L'estomac du cheval se vide rapidement après son remplissage, en partie parce que sa faible capacité ne peut contenir le volume des aliments consommés lors d'un repas. Cette configuration permet une digestion rapide et un passage efficace des aliments vers l'intestin.

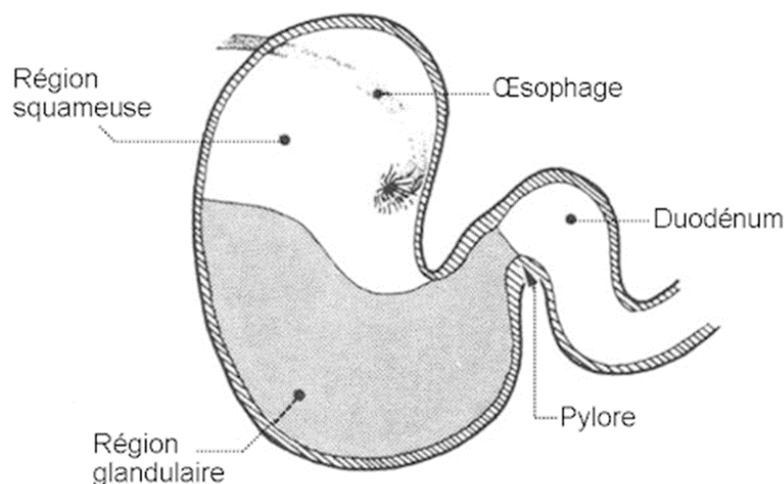


Figure 9: Structure de l'estomac du cheval

4.1.2.4. Estomac des oiseaux

Le tube digestif des oiseaux est composé de trois poches distinctes :

Le jabot : Il s'agit d'un réservoir simple où les graines se ramollissent. Le jabot ne possède pas de glandes digestives, et sa fonction principale est de stocker temporairement les aliments pour faciliter leur prétraitement avant leur passage dans les autres parties du tube digestif.

Le ventricule succenturié : Ce segment du tube digestif est un élargissement modeste, peu développé, mais doté d'une muqueuse interne riche en glandes gastriques. Les aliments n'y subissent pas de digestion importante mais sont imprégnés de suc gastrique. Ce processus prépare les aliments pour leur passage dans le gésier, où la digestion et le broyage se poursuivent.

Le gésier : Cette poche a une membrane interne coriace et est entourée de puissants muscles. Le gésier est essentiel pour broyer les aliments, notamment les graines, grâce à des graviers que l'oiseau ingère et qui facilitent le broyage. Cette action mécanique est cruciale pour réduire la taille des particules alimentaires et faciliter leur digestion dans les sections suivantes du tube digestif.

4.1.3. Intestin grêle

Le développement de l'intestin grêle chez les animaux varie considérablement en fonction de leur régime alimentaire, ce qui reflète les différences dans leurs besoins nutritionnels et leur mode de digestion.

Chez les ruminants comme le bétail, l'intestin grêle est généralement deux fois plus court que chez les chevaux. Cela est dû au fait que les ruminants ont un système digestif spécialisé qui comprend un estomac complexe avec plusieurs compartiments, permettant une fermentation et une digestion précoce des aliments. Cette fermentation dans le rumen permet une dégradation plus poussée des nutriments avant qu'ils n'atteignent l'intestin grêle, réduisant ainsi la longueur nécessaire de cet organe pour compléter la digestion.

En revanche, chez les chevaux, qui ont un système digestif moins complexe, l'intestin grêle est environ deux fois plus long que celui des ruminants. Cette longueur accrue est nécessaire pour permettre une digestion et une absorption adéquates des nutriments dans un système où la fermentation et la dégradation des aliments se produisent principalement dans le cæcum et le côlon, et non pas dans un estomac à plusieurs compartiments. Cependant, malgré cette longueur

accrue, l'intestin grêle du cheval est également deux fois plus gros en termes de diamètre que celui du bétail.

4.1.4. Gros intestin

Son développement est également en rapport avec le régime : long et compliqué chez les herbivores. Il présente chez le cheval un exceptionnel développement : 130 à 140 litres, soit les 3/4 de la capacité digestive du cheval. Celui du bœuf se limite à 40 litres environ. Le gros intestin comprend 3 parties :

- Le caecum, poche en cul-de-sac, bosselé chez le cheval, lisse chez le bœuf.
- Le colon est la partie la plus longue. Celui du cheval, de 3 m et de 80 à 90 litres, est replié 2 fois donc en 4 parties, d'où son nom de "colon replié" qui le distingue de sa partie libre, le "colon flottant", beaucoup plus petite et qui lui fait suite.
- Le rectum, partie terminale, reliée à l'anus.

Chez les oiseaux, la distinction entre l'intestin grêle et le gros intestin n'existe pas. Chez la poule, deux caecums de 8 cm débouchent dans la partie terminale de l'intestin, aboutissant au cloaque.

4.2. Quelques conséquences liées à ces différences d'anatomie

4.2.1. Digestion gastrique et digestion intestinale

Nous constatons que chez certains animaux, c'est l'estomac qui semble occuper la place prédominante dans la digestion on dit que les ruminants ont une digestion surtout gastrique. Chez d'autres, c'est l'intestin qui est le plus développé :

Le cheval a une digestion surtout intestinale. Les troubles digestifs, notamment l'indigestion, se porteront donc préférentiellement sur l'un ou l'autre de ces organes : la météorisation dominera chez les bovins, et les coliques chez le cheval.

4.2.2. Importance variable de la flore microbienne

La durée pendant laquelle les aliments séjournent dans le tube digestif, ou le "transit digestif", est déterminée par la longueur et la capacité de ce tube chez les différentes espèces. Cette durée varie considérablement entre les groupes d'animaux. Chez les oiseaux, le transit digestif est relativement court en raison de la structure plus compacte et rapide de leur tube digestif. Les aliments passent rapidement à travers les différentes sections du tube, ce qui limite le temps pendant lequel les micro-organismes peuvent interagir avec les résidus alimentaires. En

conséquence, la flore microbienne chez les oiseaux est généralement moins abondante et diversifiée. La nécessité de maintenir un poids léger pour le vol et la nature de leur alimentation contribuent à cette durée de transit plus courte.

En revanche, chez les herbivores, la durée du transit digestif est considérablement prolongée. Cela est dû à un tube digestif plus long et à une capacité accrue pour traiter les matières végétales souvent difficiles à digérer. Les herbivores, qu'ils soient ruminants ou non, ont évolué des mécanismes adaptés pour une digestion lente et approfondie des végétaux. Cette adaptation permet une fermentation prolongée dans le tube digestif, ce qui offre un environnement propice au développement d'une flore microbienne abondante.

Chez les ruminants, comme les vaches ou les moutons, la fermentation est particulièrement étendue grâce à la présence d'un estomac complexe composé de plusieurs compartiments. La fermentation se produit principalement dans le rumen, où une flore microbienne riche et diversifiée, incluant des bactéries, des protozoaires et des champignons, décompose les fibres végétales et produit des acides gras volatils. Cette capacité à maintenir une flore microbienne abondante est essentielle pour l'optimisation de la digestion des matériaux végétaux. Les ruminants bénéficient d'une digestion très efficace grâce à ce processus de fermentation prolongée.

Les herbivores monogastriques, tels que les chevaux et les lapins, possèdent un estomac unique mais compensent la digestion moins fermentative par des cæcums et des colons plus développés. Malgré une durée de transit plus courte que chez les ruminants, ces herbivores présentent également une flore microbienne notable dans leurs intestins postérieurs, bien que cette flore soit généralement moins dense que chez les ruminants.

Ainsi, la durée prolongée du transit digestif chez les herbivores favorise un environnement propice au développement d'une flore microbienne abondante, essentielle pour la digestion efficace des fibres végétales. En revanche, chez les volailles, où le transit digestif est rapide en raison d'un tube digestif plus court, la flore microbienne est relativement réduite. La différence dans la durée du transit digestif reflète les adaptations spécifiques à chaque régime alimentaire et type de digestion, influençant ainsi la diversité et l'abondance de la flore microbienne présente dans le tube digestif des animaux.

4.2.3. Quel rôle jouent ces micro-organismes ?

Les microbes, vivant en association (en "symbiose") avec l'animal dans leur tube digestif, permettent à ces animaux :

- De digérer la cellulose et autres constituants membranaires des fourrages grossiers ;
- De mieux utiliser les matières azotées de la ration ;
- De ne pas manquer, en général, des vitamines du groupe B, synthétisées par les microbes au profit de l'animal.

L'existence de cette microflore ne doit donc jamais être oubliée : c'est elle qui caractérise la digestion des ruminants et plus largement des herbivores, les rendant capables d'élaborer, à partir d'aliments inutilisables pour l'homme (les fourrages celluloseux), des aliments de haute valeur biologique tels que le lait et la viande.

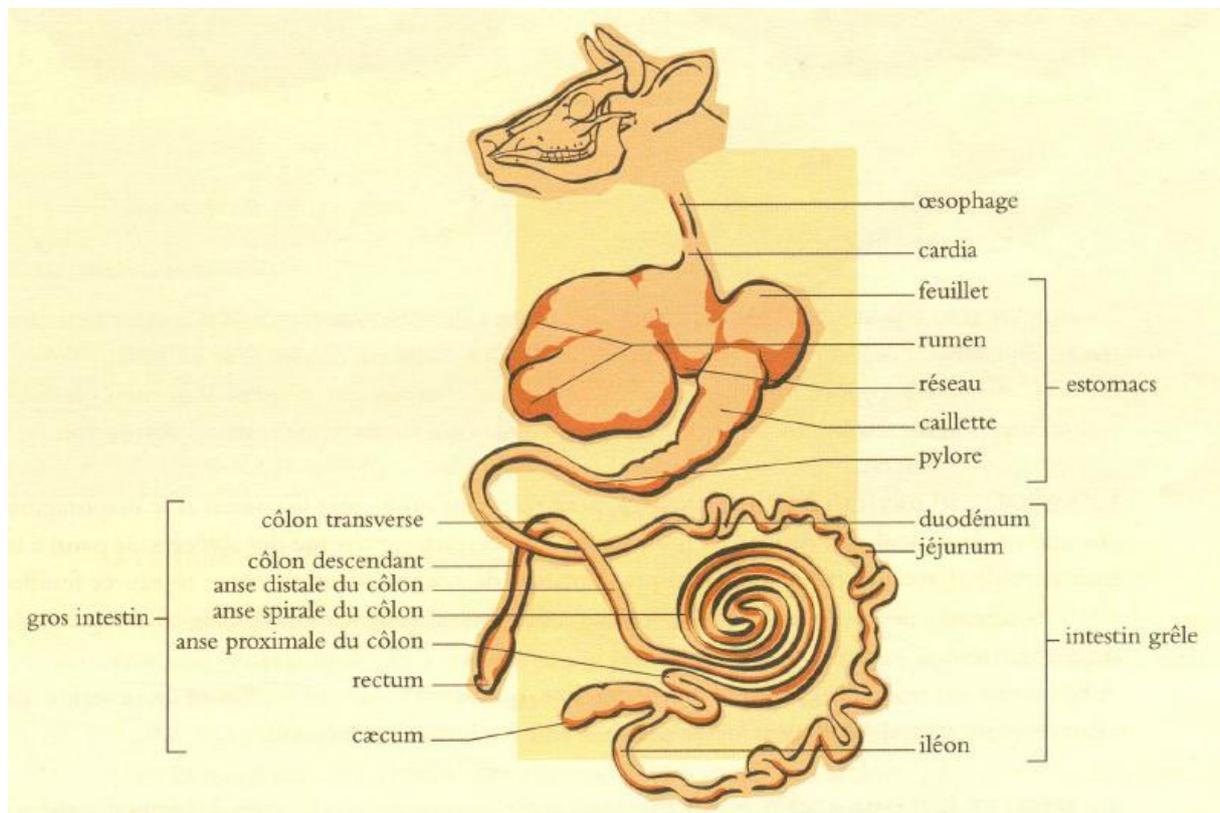


Figure 10: Représentation schématique de l'appareil digestive des bovins

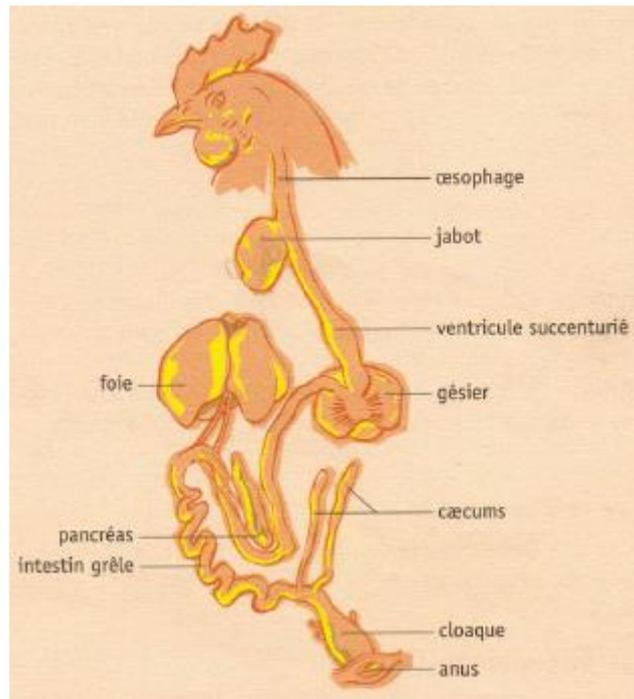


Figure 11: Représentation schématique de l'appareil digestive de la poule

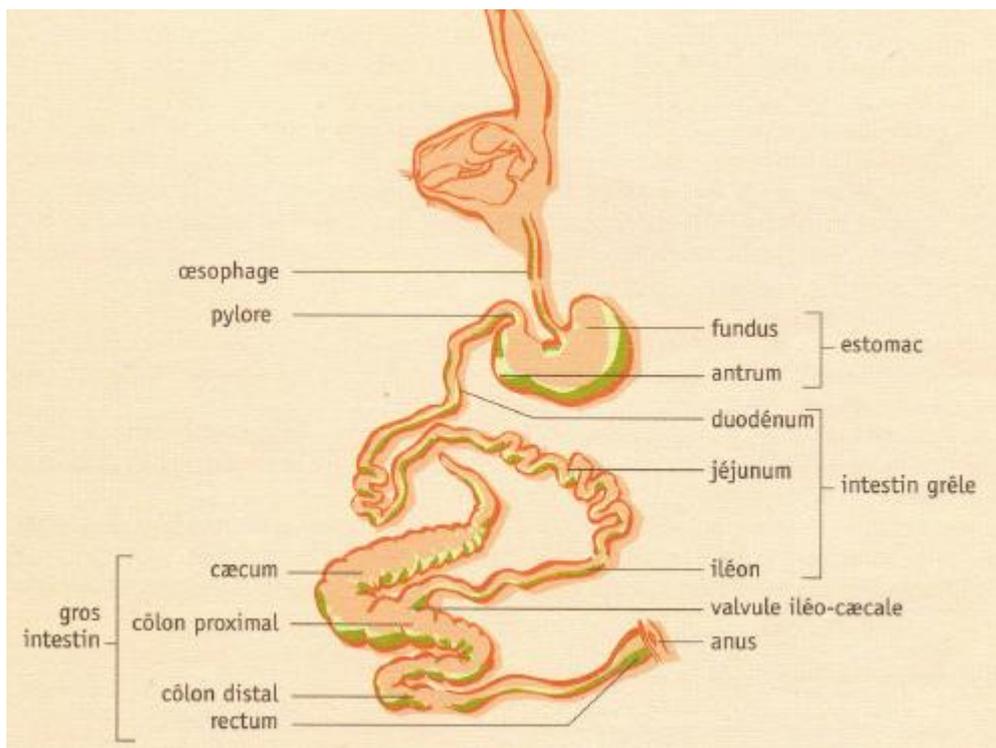


Figure 12: Représentation schématique de l'appareil digestive des lapins

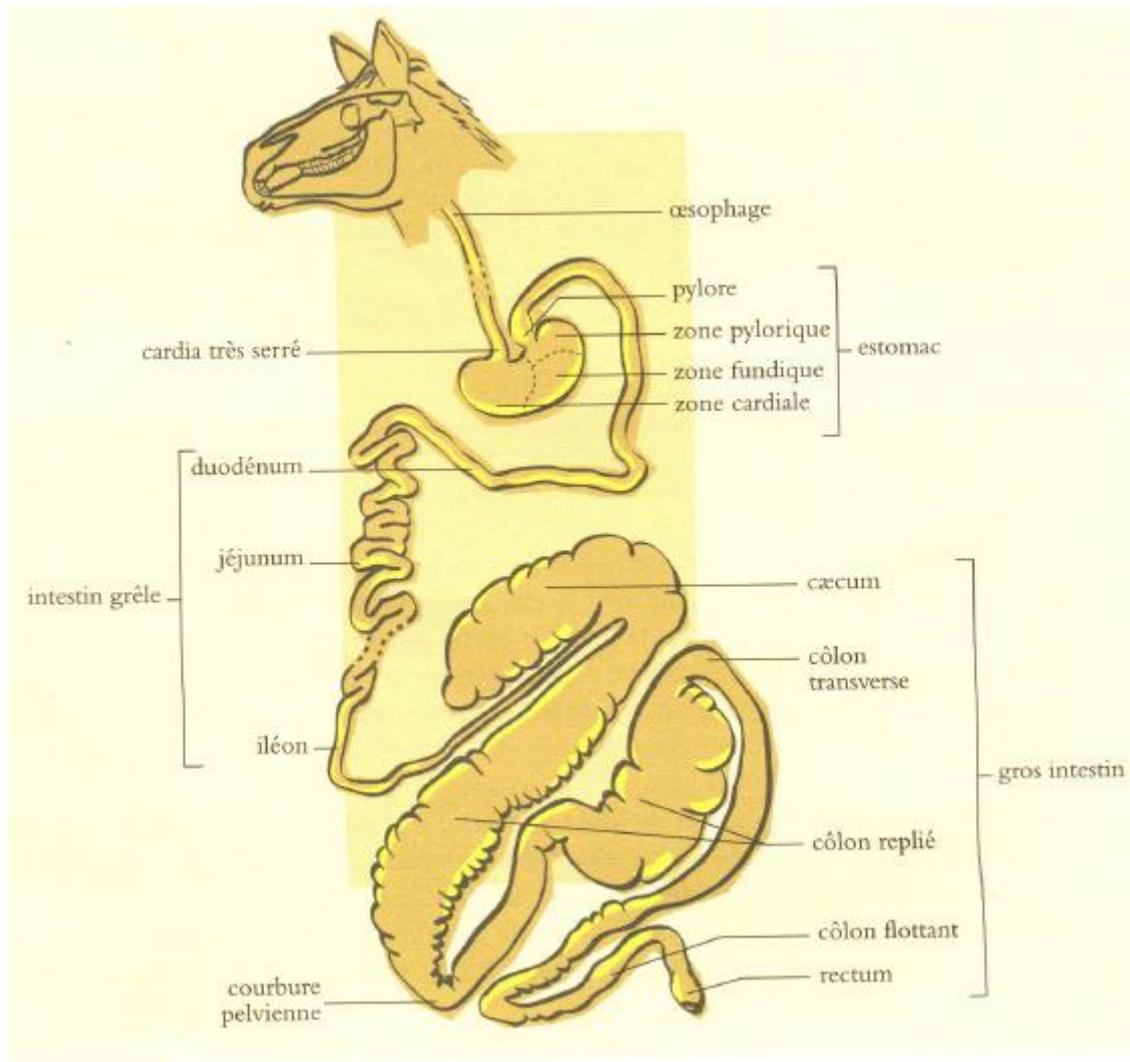


Figure 13: Représentation schématique de l'appareil digestif des chevaux

4.3. Motricité et transit digestif

4.3.1. Chez les ruminants

Les ruminants, tels que les bovins et les ovins, possèdent un système digestif complexe adapté à la fermentation microbienne et à la digestion des fibres. Le processus digestif est caractérisé par plusieurs étapes spécifiques :

4.3.1.1. Ingestion des aliments

Chez les bovins : La langue mobile permet la préhension des aliments, tandis que la mastication est rapide (70 à 80 mouvements par minute). Les aliments sont avalés avec de la salive et poussés vers l'arrière du rumen par les contractions du rumen-réseau. Les bovins arrachent l'herbe d'un coup de tête, ne pouvant pâturer qu'à une hauteur minimale de 2 cm.

Chez les ovins : Les ovins coupent l'herbe très près du sol grâce à leurs incisives inférieures fines et coupantes. Leur mode de pâturage, qui diffère de celui des bovins, leur permet de tirer parti de pâturages pauvres, bien qu'ils soient plus exposés au parasitisme.

4.3.1.2.Motricité du rumen-réseau et transit

➤ Motricité du rumen-réseau

Le rumen-réseau est rempli d'une masse alimentaire en cours de fermentation, représentant environ 85 à 90 % d'eau. Cette masse subit une dégradation chimique sous l'action des microbes, un brassage permanent et un broyage supplémentaire lors de la rumination.

Le transit sélectif vers l'omasum (feuillet) permet le passage des particules fines, tandis que les particules plus grosses sont refoulées pour être mastiquées à nouveau. Cette mastication répétée peut conduire à une quantité de matière sèche mastiquée deux à trois fois supérieure à la quantité ingérée.

➤ Transit après le rumen-réseau

Les particules alimentaires qui atteignent l'omasum mesurent généralement moins d'un millimètre. Après une déshydratation partielle dans l'omasum et une imprégnation de suc gastrique dans l'abomasum, le bol alimentaire passe dans les intestins. Le transit digestif se poursuit jusqu'à l'élimination des particules non digérées dans les fèces, environ trois jours après l'ingestion, bien que l'élimination complète puisse prendre jusqu'à douze jours.

4.3.2. Chez les monogastriques

Les monogastriques, tels que les volailles, le lapin et le cheval, possèdent un système digestif simple avec un seul estomac, adapté à une digestion rapide de divers types d'aliments.

4.3.2.1.Ingestion des aliments

Chez les volailles : Les volailles avalent directement les graines et autres particules alimentaires, sans les mâcher. Les aliments sont ensuite stockés dans le jabot pour une pré-digestion avant de passer dans le gésier pour un broyage mécanique.

Chez le lapin : Le lapin mastique finement les aliments avant de les avaler. Le caecum du lapin joue un rôle crucial dans la fermentation des fibres, produisant des cæcotrophes riches en nutriments qui sont ré-ingérés.

Chez le cheval : Le cheval mâche longuement les aliments pour les broyer finement avant de les avaler. La fermentation microbienne dans le caecum et le côlon permet la digestion des fibres alimentaires.

4.3.2.2. Motricité et transit digestif

Chez les volailles : La motricité du tube digestif est rapide, avec un transit complet prenant seulement 4 à 6 heures. Les contractions péristaltiques assurent le déplacement rapide des aliments vers l'intestin, où les nutriments sont absorbés.

Chez le lapin : Le transit digestif est relativement rapide, bien que la fermentation des fibres dans le caecum nécessite plus de temps. Le transit sélectif permet la production de cæcotrophes et de fèces dures.

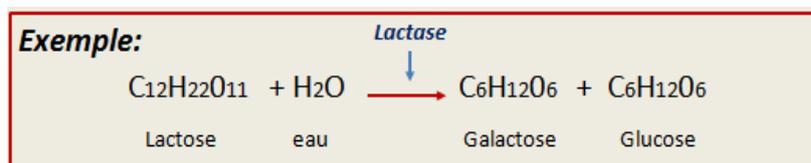
Chez le cheval : La motricité intestinale est bien développée, permettant un flux continu d'aliments. Le transit est plus lent en raison de la fermentation microbienne importante dans le caecum et le côlon, permettant une digestion et une absorption maximales des nutriments issus des fibres.

4.4. Fonctions physiologiques de l'appareil digestive

4.4.1. Digestion des glucides

4.4.1.1. Digestion des sucres solubles

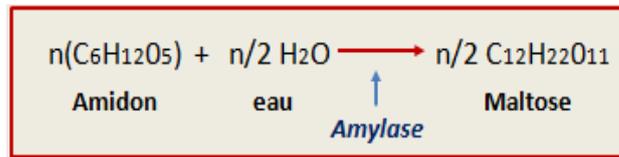
- a. **Chez les ruminants** : Ces glucides solubles (*glucose, fructose, saccharose...*) diffusent très vite dans le liquide du rumen et sont utilisés rapidement et en totalité par les microbes auxquels ils apportent de l'énergie rapidement disponible. Il disparaît donc très vite du contenu du rumen.
- b. **Chez les autres animaux** : Seuls les sucres en C6, qu'il soit libre dans les aliments ou qu'ils proviennent de sucres en C12, sont assimilables au niveau de l'intestin grêle. Les sucres en C12 (*saccharose, maltose, lactose...*) sont facilement hydrolysés.



4.4.1.2. Digestion de l'amidon

- a. **Chez les non ruminants** : L'amidon représente 40 à 75% des céréales. La salive des animaux d'élevage ne contient pas de ptyaline. La digestion de l'amidon se fait donc pour les

non ruminants dans l'intestin sous l'effet des sucs pancréatique et intestinal. L'amidon est transformé en maltose et le maltose en glucose.



b. Chez les ruminants, la digestion de l'amidon se fait surtout dans le rumen. Les amylases microbiennes l'hydrolysent en glucose. Ce dernier aura 2 destinations :

1. Les fermentations, avec formation d'AGV, d'énergie disponibles pour les microbes (ATP) et de chaleur.
2. L'absorption de ce qui reste de glucose dans l'intestin.

4.4.1.3. Digestion de cellulose

Aucune diastase digestive n'est capable d'hydrolyser la cellulose. Par contre les cellulases sécrétées par les bactéries cellulolytiques attaquent ces glucides pariétaux, les réduisant en glucose et pentose. Ces sucres simples sont alors l'objet de fermentations, qui aboutissent à :

- Production d'énergie (ATP).
- Production de gaz (CH₄ et CO₂)
- Production d'acides gras volatiles (AGV).

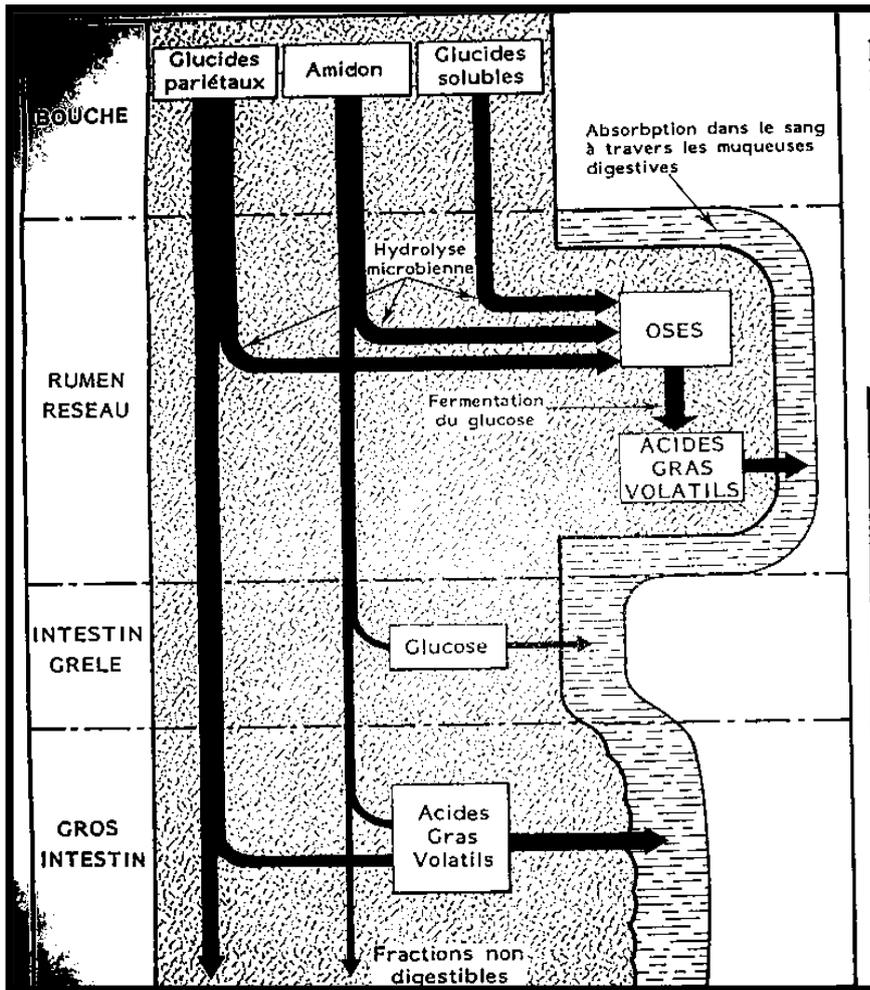


Figure 14: Digestion des glucides et l'absorption des produits obtenus.

4.4.1.4. Digestion des glucides par les ruminants

La digestion des glucides chez les ruminants entraîne la production d'acides gras volatils (AGV) dans le rumen, dont les proportions varient en fonction de la composition de la ration alimentaire et des conditions de fermentation. En général, avec des régimes habituels et à un pH de 6,5, la répartition des acides gras volatils est approximativement la suivante :

- Environ 70 % d'acide acétique (C₂),
- 15 à 20 % d'acide propionique (C₃),
- 10 à 15 % d'acide butyrique (C₄).

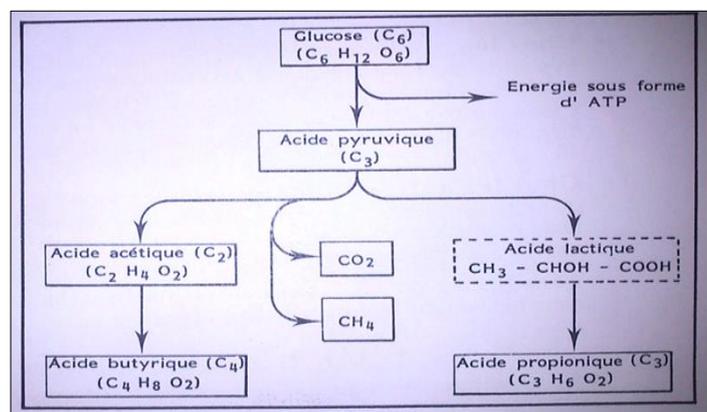


Figure 15: Fermentation du glucose dans le rumen, et la synthèse des acides gras volatiles.

Les proportions de ces acides gras volatils peuvent varier considérablement en fonction de plusieurs facteurs :

1. Rations à base de fourrages : Lorsque les fourrages constituent l'essentiel de la ration, le taux d'acide acétique est généralement plus élevé. Cela est dû au fait que les fourrages, souvent moins digestibles, entraînent une fermentation principalement produisant de l'acide acétique. En revanche, les taux d'acides propionique et butyrique diminuent dans ce cas.

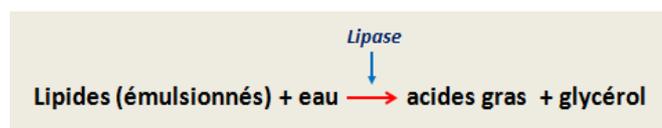
2. Rations riches en aliments concentrés : Une ration riche en aliments concentrés, notamment ceux contenant des amidons facilement fermentés, abaisse le pH du rumen. Un pH plus bas est associé à une diminution de la proportion d'acide acétique et à une augmentation relative des acides propionique et butyrique. Toutefois, un pH trop bas peut entraîner une accumulation d'acide lactique, conduisant à l'acidose, ce qui peut diminuer les niveaux d'acides propionique et butyrique également.

3. Rations riches en glucides solubles : Lorsque la ration contient des glucides solubles, comme le saccharose des betteraves fourragères, l'acide butyrique est favorisé. Cette augmentation d'acide butyrique est bénéfique pour la synthèse des matières grasses du lait. En revanche, l'acide acétique est réduit, et l'orientation propionique est moins prononcée comparée aux rations riches en amidon.

Les proportions d'acides gras volatils dans le rumen sont influencées par la composition de la ration et les conditions de fermentation. Les rations riches en fourrages tendent à augmenter l'acide acétique, tandis que les rations concentrées ou riches en glucides solubles influencent la production d'acides propionique et butyrique, avec des implications différentes pour la digestion et la production de lait

4.4.2. Digestion des lipides

a) *Chez les non ruminants*, les lipides sont émulsionnés par la bile et hydrolysés en glycérol et acides gras par le suc pancréatique et le suc intestinal :



b) *Chez les ruminants*, Les lipides en général, faiblement présents dans la ration, sont surtout constitués d'acides gras en C18 non saturés,

- Linoléique dans les fourrages,

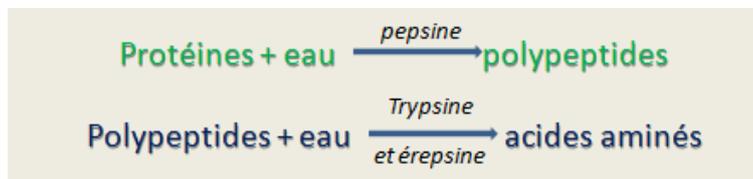
- Linoléiques dans les graines.

Les microbes du rumen en incorporent une partie dans leurs lipides et les transforment aussi en acide stéarique (C18 saturé), qui sera digéré dans l'intestin.

4.4.3. Digestion des matières azotées

a) **Chez les volailles** : Sans fermentations microbiennes intestinales importantes, seules les matières azotées protéiques sont utilisées. Les protéines sont décomposées

- En polypeptides par le suc gastrique
- Et en acides aminés par les sucs intestinal et pancréatique



b) **Chez les ruminants** : le rumen joue un rôle crucial dans la digestion des matières azotées et la synthèse des protéines grâce à son environnement microbien unique. Le rumen, en tant que cuve de fermentation, est à la fois un lieu de dégradation des matières azotées et de synthèse microbienne.

✚ Dégradation des matières azotées : la protéolyse microbienne

La protéolyse microbienne dans le rumen concerne principalement la dégradation des matières azotées non protéiques telles que les amides, les amines et les bases azotées, ainsi que des matières azotées protéiques comme les acides aminés libres, les peptides et les polypeptides. Cette dégradation est facilitée par les enzymes produits par la microflore du rumen, transformant ces matières en ammoniac (NH₃). Ce processus est essentiel car il permet la conversion rapide de ces éléments en formes utilisables par les microorganismes. Toutefois, toutes les protéines alimentaires ne sont pas complètement dégradées dans le rumen. Certaines protéines peuvent passer dans l'intestin sans avoir été entièrement décomposées par la microflore ruminale.

✚ Synthèse des protéines microbiennes : la protéosynthèse

En parallèle, les microorganismes du rumen utilisent les éléments carbonés issus des glucides, ainsi que l'ammoniac (NH₃) dérivé de la dégradation des matières azotées, pour synthétiser leurs propres protéines. Cette protéosynthèse microbienne est un processus crucial pour la nutrition des ruminants, car elle permet la production de protéines microbiennes qui sont ensuite

digérées et absorbées par l'animal. L'ammoniac excédentaire, produit en grande quantité, est absorbé à travers les parois du tube digestif (rumen et intestin). Il est ensuite soit recyclé dans la salive et retourné au tube digestif, soit transformé en urée par le foie. L'urée est ensuite éliminée par les reins via l'urine.

Transformation des protéines dans l'estomac et l'intestin

À la sortie du rumen, le contenu passe dans le réseau, le feuillet et enfin l'estomac, où il rencontre les mêmes enzymes gastriques et intestinales que chez les monogastriques :

- La pepsine gastrique, qui commence la dégradation des protéines en polypeptides,
- La trypsine pancréatique, qui hydrolyse les polypeptides en acides aminés,
- L'érepsine intestinale, qui continue cette hydrolyse des polypeptides en acides aminés.

Ces enzymes permettent de transformer les protéines alimentaires non décomposées par la microflore du rumen ainsi que les protéines microbiennes en acides aminés, qui sont ensuite absorbés et utilisés par l'animal pour ses propres besoins métaboliques.

En somme, le rumen des ruminants est non seulement un site de fermentation et de dégradation des matières azotées, mais aussi un centre de synthèse des protéines microbiennes, qui joue un rôle vital dans la nutrition et la santé de l'animal.

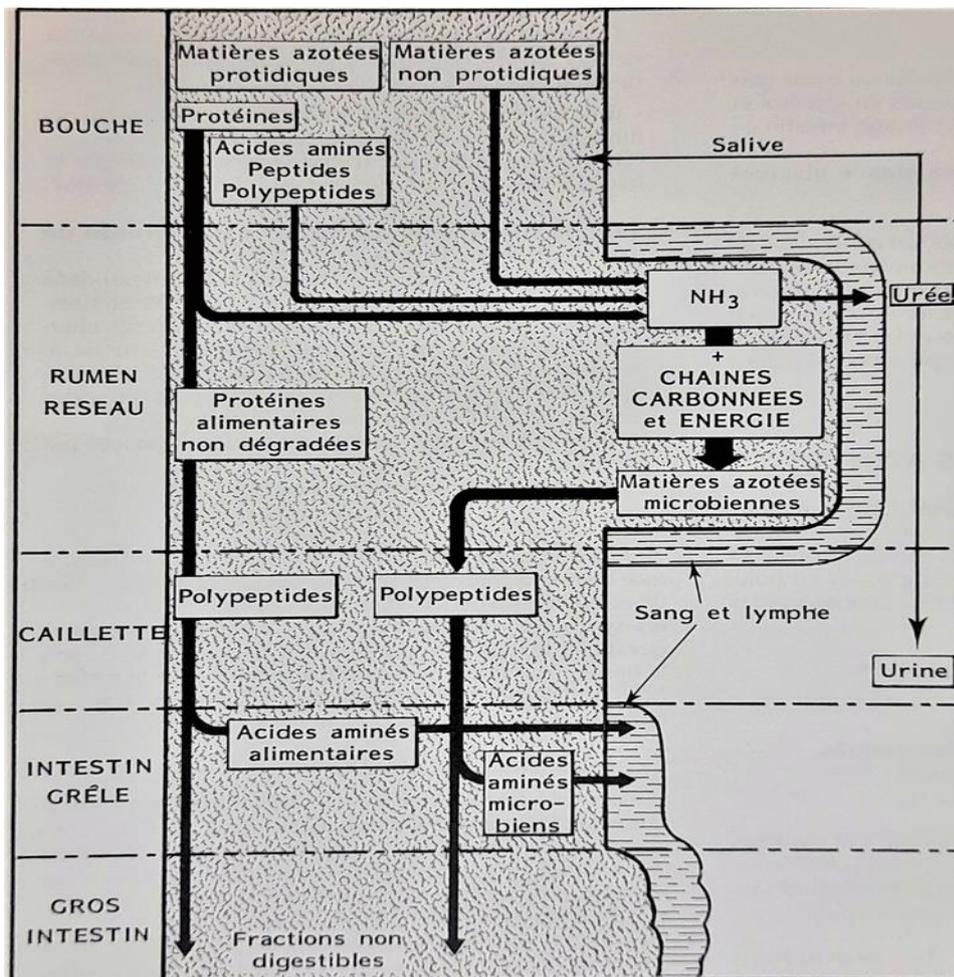


Figure 16: Digestion des matières azotées et l'absorption des produits obtenus

c) Chez les chevaux

La "protéolyse microbienne-protéosynthèse" est un processus qui intervient principalement dans le système digestif des ruminants, mais il est aussi présent chez les chevaux, bien que de manière différente et moins efficace. Chez le cheval, ce mécanisme se déroule dans l'intestin, en aval des sucs digestifs. Ce processus implique deux étapes principales :

Protéolyse microbienne : Dégradation des protéines alimentaires par les microbes présents dans le système digestif, principalement dans le cæcum et le côlon.

Protéosynthèse microbienne : Synthèse de nouvelles protéines par ces mêmes microbes.

Contrairement aux ruminants, où la synthèse de protéines microbiennes dans le rumen est une source majeure de protéines assimilables, les chevaux utilisent beaucoup moins ces protéines microbiennes. En effet, la majeure partie de ces protéines est synthétisée dans la portion postérieure du tube digestif, après l'estomac et l'intestin grêle, ce qui limite leur absorption et

leur utilisation par l'organisme du cheval. Par conséquent, une grande partie des protéines microbiennes est simplement excrétée dans les fèces.

En raison de l'efficacité limitée de la protéosynthèse microbienne chez les équidés, ceux-ci nécessitent une alimentation riche en protéines de haute valeur biologique. Cela signifie que les protéines fournies doivent contenir une proportion élevée d'acides aminés indispensables (essentiels), que le cheval ne peut pas synthétiser lui-même. Ces besoins sont particulièrement critiques lors des périodes de forte demande en protéines, telles que la lactation, les juments en lactation nécessitent des quantités accrues de protéines de haute qualité pour produire du lait riche en nutriments. Et la croissance, les jeunes chevaux en pleine croissance ont besoin de protéines suffisantes pour soutenir leur développement musculaire, osseux et tissulaire.

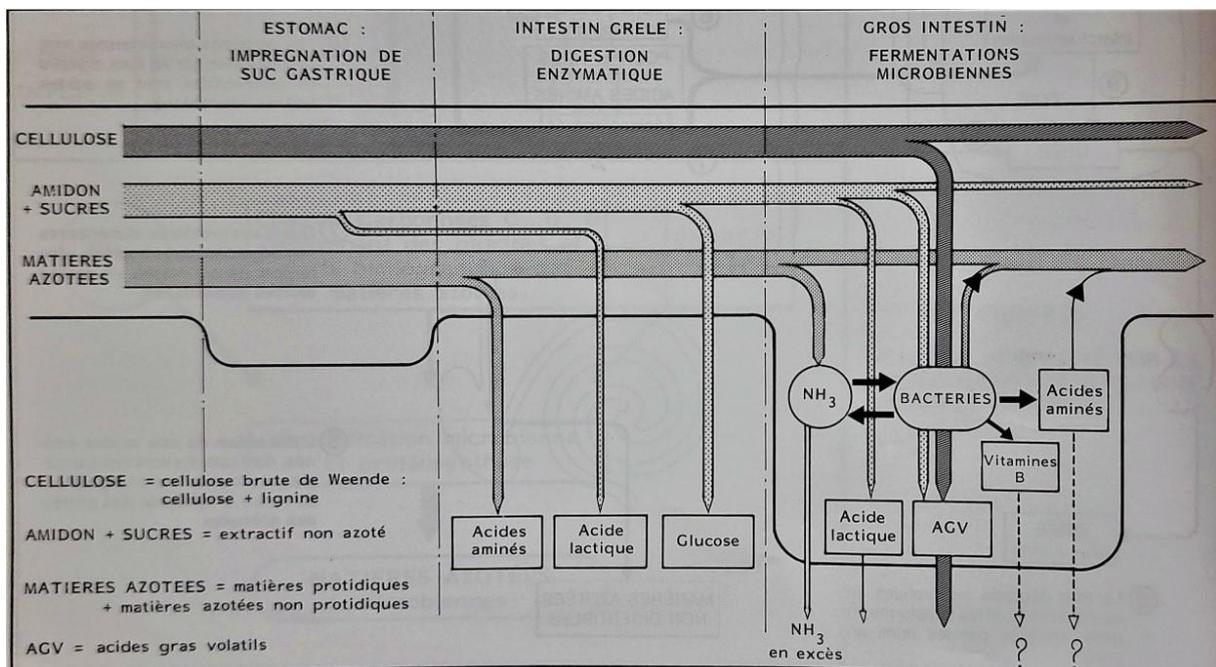


Figure 17: Digestion et l'absorption chez le cheval

d) Chez les lapins

✚ Synthèse de protéines microbiennes

Tout comme chez les équidés, les lapins présentent une synthèse de protéines microbiennes dans leur intestin, précisément dans le cæcum, où se déroule également la fermentation de la cellulose. Les microbes présents dans cette région décomposent les fibres alimentaires et produisent des protéines ainsi que des vitamines du groupe B.

✚ Mécanisme de la caecotrophie

Les lapins ont développé un mécanisme unique pour maximiser l'utilisation des protéines microbiennes et des vitamines B produites dans leur cæcum : la caecotrophie. Ce processus consiste à ingérer des boulettes spéciales appelées caecotrophes ou crottes molles, qui ne sont pas de véritables excréments. Ces boulettes sont formées dans le cæcum et sont excrétées par l'anus du lapin à des moments spécifiques de la journée.

Récupération des nutriments

Une fois expulsés, les lapins ingèrent immédiatement ces caecotrophes, les réintroduisant ainsi dans leur système digestif pour un second passage. Ce second passage permet :

- La digestion des protéines microbiennes : Les protéines contenues dans les caecotrophes sont alors dégradées et absorbées par l'organisme.
- L'assimilation des vitamines B : Les vitamines produites par les microbes sont également absorbées lors de ce second passage.

Ce mécanisme est essentiel pour la nutrition du lapin, car il lui permet de tirer un maximum de bénéfices de son alimentation riche en fibres, une stratégie d'adaptation clé pour un herbivore monogastrique. En l'absence de caecotrophie, les lapins ne pourraient pas absorber ces nutriments cruciaux, ce qui pourrait entraîner des carences nutritionnelles.

La caecotrophie illustre la complexité et l'efficacité du système digestif du lapin, lui permettant de récupérer et d'utiliser les protéines microbiennes et les vitamines essentielles produites dans le cæcum. Ce mécanisme montre à quel point les processus digestifs peuvent être adaptés en fonction des besoins spécifiques de l'espèce.

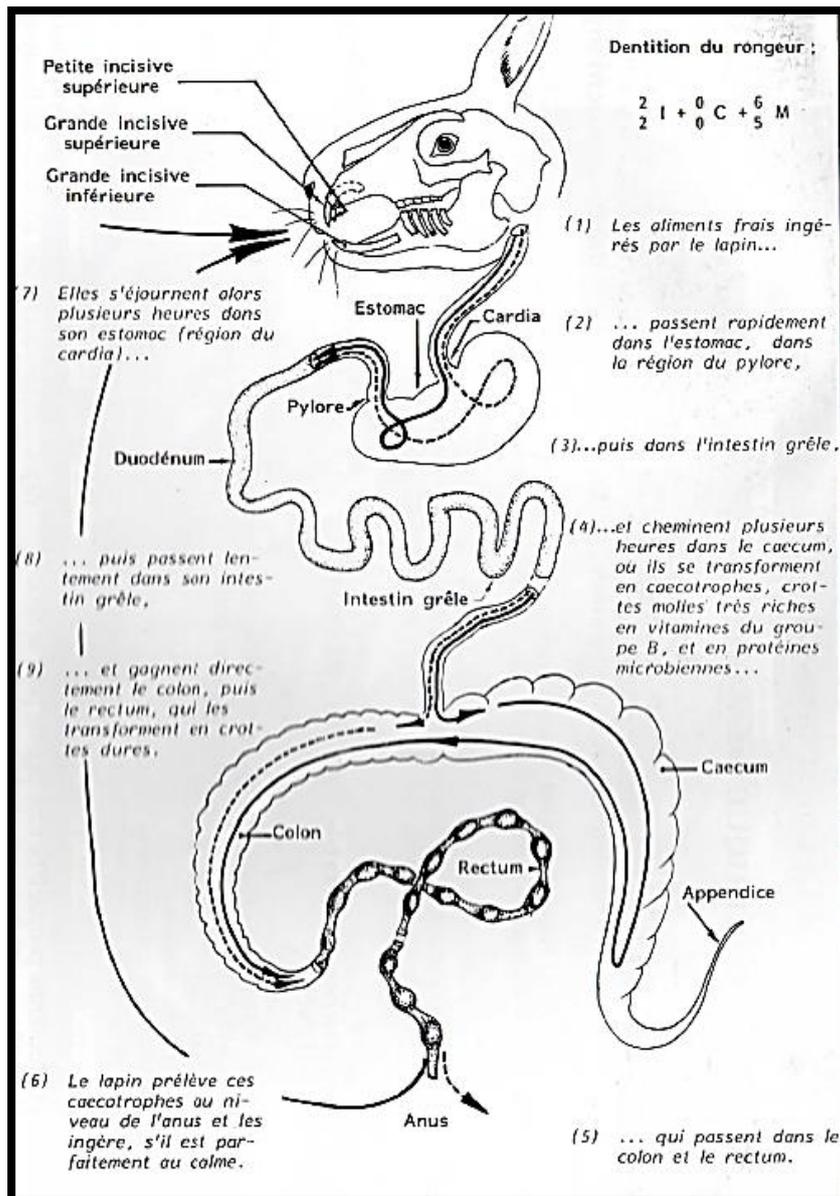


Figure 18: Mécanisme de la caecotrophie chez le lapin

4.5. Rôle de la flore digestive

Les phénomènes microbiens se déroulent principalement dans le réticulo-rumen et ultérieurement, mais à faible intensité, au niveau du gros intestin grâce à la présence d'une population microbienne hétérogène.

Cet écosystème est constitué essentiellement de populations : la microflore, les protozoaires et les champignons.

4.5.1. Microflore bactérienne

La population bactérienne du rumen est extrêmement dense, variant entre 8×10^9 et 4×10^{10} bactéries par millilitre de contenu ruminal. Cette population bactérienne constitue environ 50%

de la biomasse microbienne totale du rumen et représente la catégorie la plus complexe et la plus cruciale pour la digestion. Plus de 300 espèces bactériennes ont été identifiées dans le rumen, et la majorité d'entre elles sont des anaérobies stricts, adaptées à un environnement dépourvu d'oxygène. Ces bactéries jouent un rôle essentiel dans la digestion des fourrages, notamment par leur capacité à décomposer la cellulose.

Les bactéries du rumen peuvent être classées selon leur fonction digestive spécifique :

Bactéries cellulolytiques : Ce groupe est le plus important pour la digestion de la cellulose. Les principales espèces cellulolytiques présentes dans le rumen incluent *Ruminococcus albus*, *Ruminococcus flavefaciens*, et *Bacteroides succinogenes*. Ces bactéries sont capables d'hydrolyser complètement la cellulose des fourrages, facilitant ainsi la dégradation des fibres végétales complexes.

Bactéries amylolytiques : Ces bactéries sont spécialisées dans la dégradation de l'amidon. Les espèces représentatives de ce groupe sont *Selenomonas ruminantium* et *Streptococcus bovis*. Elles jouent un rôle crucial dans la décomposition des amidons présents dans les aliments, contribuant ainsi à la libération de glucose et autres produits fermentés.

Bactéries méthanogènes : Les bactéries de ce groupe, telles que *Methanobacterium ruminantium* et *Methanobrevibacter mobile*, sont responsables de la production de méthane. Ce processus de méthanogenèse est essentiel pour maintenir l'équilibre des gaz dans le rumen et pour l'évacuation du dioxyde de carbone produit lors de la fermentation.

Bactéries pectinolytiques : Bien que leur rôle ne soit pas toujours aussi central que celui des bactéries cellulolytiques, les bactéries pectinolytiques sont importantes pour la dégradation des pectines, un composant des parois cellulaires des plantes. Leur action contribue à l'optimisation de la digestion des matériaux végétaux.

Bactéries protéolytiques : Ces bactéries sont responsables de la dégradation des protéines dans le rumen. Elles transforment les protéines alimentaires en peptides et acides aminés, qui sont ensuite utilisés par les microbes pour leur propre croissance ou absorbés par l'animal.

La synergie entre ces différents groupes de bactéries permet une digestion efficace et complète des fourrages, assurant ainsi la disponibilité des nutriments nécessaires à la croissance et à la santé des ruminants.

4.5.2. Protozoaires

Les protozoaires du rumen sont des eucaryotes unicellulaires, mobiles grâce à leurs cils ou flagelles. Leur rôle dans la digestion des ruminants est complexe et varié, et leur présence contribue de manière significative à la dégradation des aliments.

Les protozoaires ciliés sont les plus abondants et les plus influents dans le rumen. Leur concentration varie de 10^5 à 10^8 cellules par millilitre de contenu ruminal, et ils mesurent généralement entre 50 et 300 micromètres. Les protozoaires ciliés se divisent en deux groupes principaux :

- Les holotriches : Ces protozoaires fermentent les sucres solubles, les fructosanes, ainsi que les grains d'amidon de petite taille. Leur capacité à décomposer ces substrats contribue à la production de divers acides gras volatils, qui sont essentiels pour la nutrition des ruminants.
- Les entodiniomorphes : Ces protozoaires jouent un rôle dans la dégradation de la cellulose, de l'hémicellulose et des substances pectiques. Leur présence aide à l'hydrolyse des composants végétaux complexes, facilitant ainsi la digestion des fibres du fourrage.

Les protozoaires flagellés, en revanche, sont présents en moindre quantité, avec une concentration variant de 10^3 à 10^4 cellules par millilitre. Bien qu'ils produisent des enzymes qui participent directement à la digestion, leur rôle n'est pas aussi crucial que celui des protozoaires ciliés. Leur présence n'est pas indispensable à la survie des ruminants, mais ils contribuent néanmoins à la diversité de la flore microbienne et à la complexité des processus digestifs.

Les protozoaires jouent plusieurs rôles importants dans le rumen :

Fonction cellulolytique : Plusieurs espèces de protozoaires ciliés ont montré une capacité à décomposer la cellulose, ce qui est crucial pour la digestion des fibres végétales.

Activités hémicellulolytiques et pectinolytiques : Une dizaine d'espèces de protozoaires ciliés contribuent également à la dégradation de l'hémicellulose et des pectines, augmentant ainsi la digestibilité des matériaux végétaux.

Activités protéolytiques et lipolytiques : Les protozoaires ciliés assurent environ 10 % de l'activité protéolytique et 30 à 40 % de la fonction lipolytique. Ces processus sont essentiels pour la dégradation des protéines et des lipides, fournissant ainsi des nutriments supplémentaires pour les ruminants.

4.5.3. Champignons

Les champignons du rumen, bien qu'en quantité moindre par rapport aux bactéries et protozoaires, jouent un rôle crucial dans le processus de digestion des ruminants. Ils sont des anaérobies stricts, ce qui signifie qu'ils vivent et prospèrent dans des environnements dépourvus d'oxygène. Ils représentent environ 8 % de la biomasse microbienne totale du rumen, contribuant ainsi de manière significative à la digestion des fourrages.

Les principales espèces de champignons du rumen sont *Neocallimastix frontalis* et *Piromonas communis*. Ces champignons sont presque exclusivement cellulolytiques, ce qui signifie qu'ils ont la capacité de décomposer la cellulose des parois cellulaires des plantes. Leur action est facilitée par la production de cellulases, des enzymes capables d'hydrolyser les liaisons dans la cellulose, permettant ainsi une dégradation plus efficace des fibres végétales.

Les cellulases produites par ces champignons sont parmi les plus actives dans le rumen, ce qui permet une décomposition approfondie des composants cellulaires complexes des végétaux. Cette action contribue à améliorer la digestibilité des fourrages et à optimiser l'utilisation des nutriments par les ruminants. En décomposant la cellulose, les champignons du rumen favorisent la libération des nutriments contenus dans les matériaux végétaux, facilitant ainsi leur absorption par l'animal.

4.6. Absorption des nutriments

Les produits terminaux de la digestion sont absorbés à travers la paroi du tube digestif pour être déversés dans le sang et la lymphe sous forme de nutriments. Bien que tous les épithéliums aient la propriété d'être perméables, celui de la muqueuse digestive présente des aspects particuliers, notamment au niveau de l'intestin grêle.

L'absorption a principalement lieu au niveau de l'intestin grêle, mais elle existe également au niveau du gros intestin, surtout chez les herbivores, et des préestomacs chez les ruminants.

4.6.1. Chez les non-ruminants

L'absorption a lieu principalement dans l'intestin grêle, sauf pour l'eau où le gros intestin joue un rôle important.

Au niveau du gros intestin, l'absorption d'eau et de sels minéraux est importante chez tous les animaux. Le gros intestin est également le siège de l'absorption de certains nutriments organiques (acides gras volatils, acides aminés en faibles quantités, vitamines B).

Chez les chevaux et le lapin : La muqueuse du gros intestin, absorbe les AGV provenant de la fermentation intestinale de la cellulose.

4.6.2. Chez les ruminants

Chez les ruminants, l'absorption a principalement lieu au niveau de l'intestin grêle, mais aussi des préestomacs.

Au niveau des préestomacs : Au niveau du rumen-réseau, la majeure partie des acides gras volatils, résultant de la dégradation des glucides, et une partie de l'ammoniac, résultant de la dégradation de la matière azotée non utilisée par les micro-organismes, sont absorbés. La présence de papilles dans le rumen et d'alvéoles dans le réseau augmente la surface d'échange et facilite l'absorption.

Au niveau du feuillet, les nombreuses lamelles permettent des échanges d'eau et de sels minéraux très importants, se traduisant par une augmentation de la teneur en matière sèche du contenu. Le reste des acides gras volatils peut aussi être absorbé.

Au niveau des intestins, Comme chez les monogastriques, l'intestin grêle est le lieu de l'absorption de nombreux nutriments (acides aminés d'origine microbienne et alimentaire, oses issus de la dégradation des glucides, acides gras, glycérol, etc.).

La muqueuse du gros intestin, absorbe surtout de l'eau et des sels minéraux. Mais elle absorbe aussi les AGV, surtout l'acide acétique formés par l'attaque microbienne de la cellulose dans le caecum.

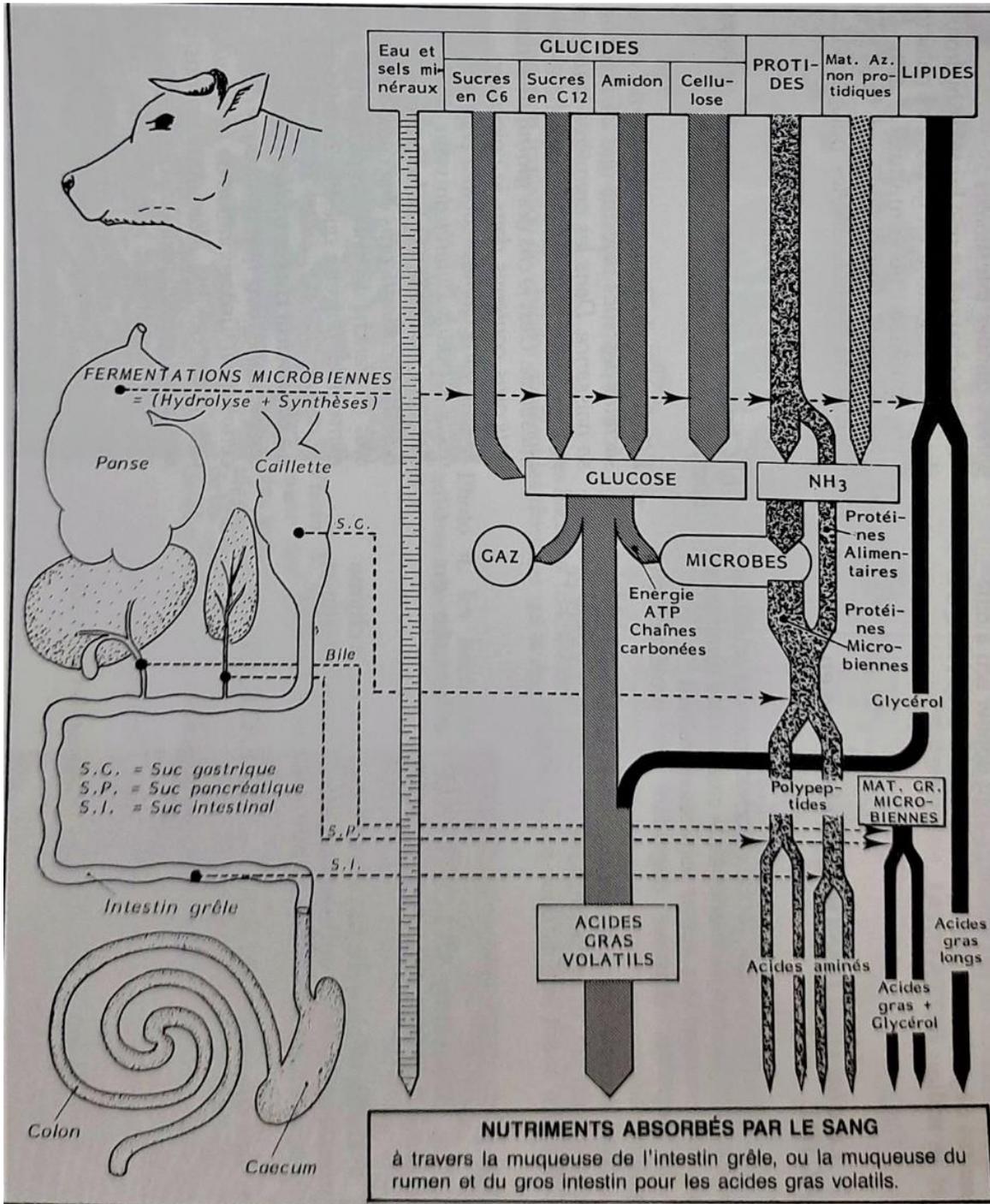


Figure 19: Digestion et absorption chez les ruminants

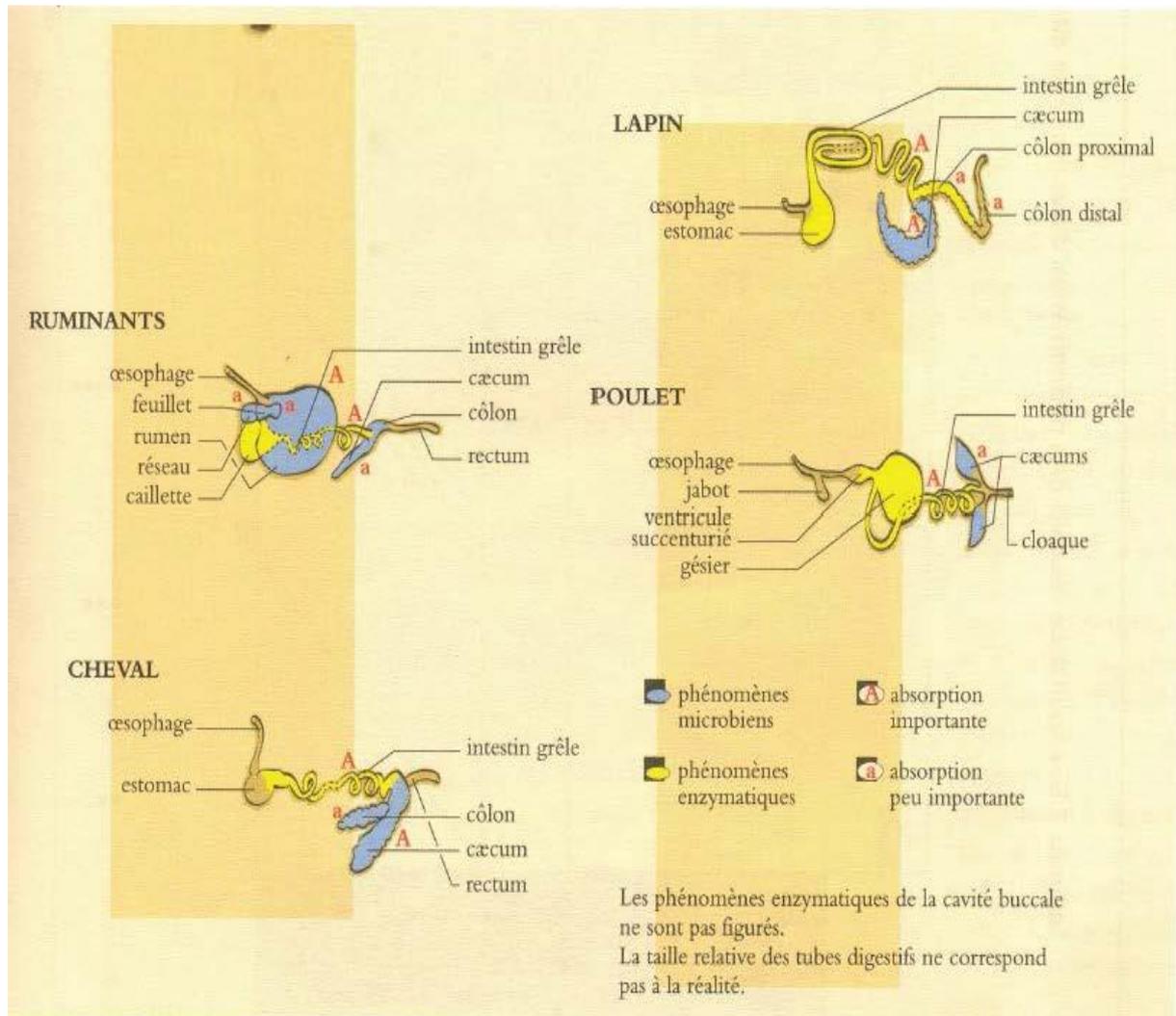


Figure 20: Localisation des phénomènes enzymatiques et microbiens et de l'absorption chez les ruminants, le cheval, lapin et le poulet

Chapitre 02 :

Actions digestives des différentes espèces animales

Substances complexes le plus souvent insoluble, les ALIMENTS ingérés ne peuvent, sous cette forme, être absorbés par le sang. Les actes de la digestion vont transformer ces substances en produits de composition plus simple, les NUTRIMENTS, qui seront absorbés par les muqueuses digestives. Cette simplification (dégradation) est réalisée par des processus qui se complètent :

- ✚ Mécaniques : broyage, ramollissement, brassage.
- ✚ Biologiques : fermentations microbiennes.
- ✚ Chimiques : action des diastases digestives

1. Dégradation mécanique des aliments

1.1 Chez les ruminants

1.1.1 Broyage énergétique par 2 mastications

La mastication chez les ruminants se déroule en deux phases distinctes qui sont essentielles pour une digestion efficace. La première mastication est rapide, avec une fréquence de 70 à 90 mouvements par minute. Au cours de cette étape initiale, les aliments, encore peu divisés, sont mélangés avec l'eau de boisson et la salive, puis s'entassent dans la panse. Cette première mastication est deux fois plus rapide chez les petits ruminants, comme les ovins et les caprins, avec une fréquence de 125 à 150 mouvements par minute.

Après la première mastication, les aliments passent dans le rumen où ils sont fermentés. La mastication mérycique, ou rumination, est le processus par lequel les aliments sont remontés du rumen vers la cavité buccale pour être soumis à une seconde mastication. Ce processus permet une nouvelle insalivation et prépare les aliments à retourner dans la panse pour une fermentation supplémentaire. La rumination dure généralement de 4 à 10 heures par jour, réparties en 6 à 8 périodes de 40 à 50 minutes chacune. Ce mécanisme joue un rôle crucial dans la digestion en facilitant l'action des fermentations microbiennes. En brisant les membranes cellulaires des aliments, la rumination expose les nutriments à l'action des enzymes digestives. De plus, elle stimule une sécrétion intense de salive, ce qui améliore encore la digestion.

Le déclenchement de la rumination est induit par l'excitation créée par des aliments grossiers au niveau de la gouttière œsophagienne et du réseau. La rugosité de ces aliments favorise le

réflexe de rumination. Plusieurs conditions doivent être remplies pour que ce réflexe soit optimal : le rumen doit être suffisamment rempli pour que la masse alimentaire soit en contact avec le cardia, et la ration doit contenir des aliments grossiers qui exercent une action mécanique sur les alvéoles du réseau. Les aliments doivent également être dans un milieu suffisamment liquide, car une insalivation insuffisante peut inhiber la rumination. De plus, la rumination ne se produit que lorsque l'animal est au repos, étant couché pendant 80 à 90 % du temps consacré à cette activité. L'état de santé de l'animal peut également influencer la rumination, bien que certaines maladies chroniques comme la tuberculose n'affectent pas significativement ce processus.

La durée totale de la mastication, incluant à la fois l'ingestion et la rumination, varie en fonction de la teneur en fibres des aliments consommés. En général, le temps total de mastication par kilogramme de matière sèche est de 5 à 10 minutes pour les aliments concentrés, 40 à 50 minutes pour un régime mixte ensilage-concentré, 60 à 65 minutes pour un régime à base d'herbe feuillue, et jusqu'à 180 minutes pour un régime composé principalement de paille de blé.

1.1.2 Insalivation abondante

La sécrétion salivaire chez les ruminants est à la fois abondante et continue, atteignant jusqu'à 100 à 200 litres par jour pour un gros bovin. Contrairement à celle des humains, la salive des ruminants ne contient pas de ptyaline, une diastase amylasique responsable de la digestion des glucides. Cependant, elle est riche en eau, mucus, urée, ainsi qu'en bicarbonates et phosphates de sodium et de potassium. Ces sels basiques jouent un rôle crucial en neutralisant les acides produits par les fermentations microbiennes dans le rumen, faisant de la salive une solution tampon efficace pour maintenir un environnement adéquat pour la digestion.

La quantité de salive produite est influencée par la nature des aliments ingérés. Les aliments grossiers stimulent particulièrement la sécrétion salivaire. La présence de ces aliments dans le rumen excite la zone du cardia, ce qui déclenche le réflexe de salivation. Une salivation abondante est ainsi essentielle pour une digestion efficace et pour préparer les aliments à la fermentation en assurant une bonne fluidité et une bonne homogénéité du contenu du rumen.

Lorsque la salivation est insuffisante, souvent en raison de l'ingestion d'aliments très tendres qui ne stimulent pas suffisamment la production de salive, des problèmes peuvent survenir. L'insuffisance de salivation rend le contenu du rumen plus visqueux et moins fluide. Les gaz produits par la fermentation peuvent alors former des mousses qui obstruent le cardia,

provoquant une accumulation de gaz dans la panse, connue sous le nom de météorisation. Cette condition est désignée sous le terme « indigestion spumeuse ». Pour prévenir ce problème, la distribution d'aliments grossiers est recommandée, car elle favorise une salivation accrue, ce qui réduit les risques de météorisation en assurant une meilleure gestion des gaz et une consistance plus adéquate du contenu ruminal.

1.1.3 Brassage prolongé

Le brassage prolongé du contenu digestif chez les ruminants est principalement assuré par les contractions continues de la tunique musculaire du rumen. Ces contractions sont particulièrement intensifiées pendant la mastication, contribuant à un mélange constant des aliments avec les sécrétions digestives et à une fermentation efficace. Pendant ce processus, le réseau, qui est également impliqué dans la digestion, est parcouru par des contractions similaires à celles du rumen. Ce mouvement coordonné assure une bonne distribution des aliments et des sécrétions digestives à travers les différents compartiments de l'estomac.

Le feuillet, un autre compartiment digestif, se distend au cours des contractions du rumen. Cette distension permet un déplacement harmonieux des aliments et une intégration efficace des éléments digestifs dans le système. En revanche, les contractions de la caillette sont plus lentes et irrégulières comparées à celles du rumen et du réseau. Cette lenteur et irrégularité sont adaptées aux fonctions spécifiques de la caillette, qui se concentre sur la digestion enzymatique et l'absorption des nutriments plutôt que sur le brassage actif. Ainsi, chaque compartiment de l'estomac des ruminants joue un rôle distinct mais complémentaire dans le processus global de digestion, assurant une transformation efficace des aliments et une absorption optimale des nutriments.

1.2 Chez le cheval

Chez le cheval, la mastication est plus approfondie par rapport à celle des ruminants en raison de l'absence de rumination. Pour réduire les particules de foin à une taille inférieure à 1,6 mm, le cheval nécessite environ 40 minutes par kilogramme de foin, et ce processus implique environ 3000 coups de mâchoire. En revanche, pour les grains, le processus est beaucoup plus rapide, nécessitant seulement 10 minutes par kilogramme.

La sécrétion salivaire chez le cheval est intermittente, avec un total variant de 5 à 50 litres par jour, en fonction de la nature plus ou moins aqueuse des aliments consommés. Cette variabilité dans la production de salive reflète la composition des aliments, qui influence la quantité de salive nécessaire pour une bonne digestion.

Le brassage stomacal chez le cheval est relativement faible comparé à celui des ruminants. L'estomac du cheval se vide environ 2 à 3 fois pendant un repas, ce qui signifie que le brassage est moins actif. En revanche, le brassage intestinal, notamment dans le cæcum, est prolongé. Le cæcum joue un rôle crucial dans la fermentation des fibres et le processus digestif global, ce qui explique pourquoi le brassage intestinal est plus intense et plus prolongé que le brassage dans l'estomac. Ce brassage prolongé dans le cæcum permet une digestion plus complète des matériaux végétaux, compensant ainsi l'absence de rumination.

1.3 Chez les volailles

Chez les volailles, le processus digestif commence par le ramollissement des aliments dans le jabot. Le jabot, qui est une poche de stockage située avant l'estomac véritable, ne possède pas de glandes digestives. Il joue toutefois un rôle crucial dans l'humidification des aliments grâce à l'eau de boisson que les volailles ingèrent, bien que la salivation contribue peu à ce processus. L'humidification dans le jabot prépare les aliments pour les étapes suivantes de la digestion.

Le broyage des aliments intervient après leur passage dans le ventricule succenturié, également appelé le gésier. Ce dernier, un organe musculaire puissant, utilise les graviers que les volailles ont ingérés pour malaxer et broyer les aliments. Les graviers agissent comme des meules naturelles, aidant à réduire les particules alimentaires en morceaux plus petits. Ce broyage mécanique est essentiel pour transformer les aliments en une forme plus digeste, facilitant ainsi la digestion chimique et enzymatique qui suivra dans les sections ultérieures du tube digestif. Ce processus de broyage et de malaxage permet aux volailles de traiter efficacement une variété d'aliments, contribuant ainsi à une digestion plus complète et à une meilleure absorption des nutriments.

2. Dégradation biologique des aliments

2.1 Fonction digestive propre aux herbivores

La digestion chez les herbivores, en particulier chez les ruminants, présente une particularité marquée par la contribution essentielle d'une multitude de micro-organismes vivants en symbiose avec l'animal. Ces micro-organismes jouent un rôle crucial dans la dégradation des matières végétales, permettant une digestion efficace des fibres complexes. Chez les herbivores non ruminants, tels que les chevaux et les lapins, cette fonction est assumée de manière moins efficace par le cæcum et le côlon, qui sont particulièrement développés pour compenser l'absence de rumination.

2.2 Milieu du rumen est stable

Le rumen, compartiment central du système digestif des ruminants, offre un environnement physiquement et chimiquement stable, propice à la vie des micro-organismes. Cette stabilité est caractérisée par une température élevée, oscillant entre 39 et 40 °C, un milieu anaérobie avec une concentration de 60 à 70 % de dioxyde de carbone (CO₂) et de 25 % de méthane (CH₄), ainsi qu'un pH relativement constant entre 6 et 7. Les acides produits par la digestion de la cellulose sont neutralisés par les sels basiques de la salive et par l'ammoniac issu de la dégradation des matières azotées. L'arrivée régulière de fourrage et le brassage permanent dans le rumen favorisent également un environnement optimal pour la prolifération intense des micro-organismes.

2.3 Les microbes vivent en symbiose pour eux-mêmes, mais l'animal en tire profit.

Ces micro-organismes, en vivant en symbiose avec l'animal, réalisent plusieurs actions bénéfiques. Ils produisent des enzymes qui hydrolysent les aliments, facilitant leur dégradation. La fermentation qui en résulte génère divers produits, notamment de l'énergie, des gaz, et des acides gras volatils (AGV). De plus, ils synthétisent des substances telles que des vitamines du groupe B et leurs propres protéines. Ces protéines microbiennes sont particulièrement précieuses pour l'animal car elles contiennent pratiquement tous les acides aminés indispensables à sa nutrition.

En retour, l'animal bénéficie de cette symbiose de plusieurs façons. Il utilise les acides gras volatils produits par les microbes comme source d'énergie, profite de la synthèse de vitamines B, et digère les protéines microbiennes, qui sont une source essentielle de protéines de haute qualité. Cette interaction souligne l'importance de la flore microbienne pour la santé et la nutrition des ruminants.

Il est crucial pour les éleveurs de se rappeler que nourrir un animal implique également de nourrir sa flore microbienne. Un changement brusque dans l'alimentation peut perturber les conditions de vie des micro-organismes, altérer leur multiplication et nuire à la santé de l'animal. Ainsi, toute transition alimentaire doit être effectuée progressivement pour maintenir l'équilibre de la flore microbienne et assurer une digestion optimale.

3. Dégradation chimique des aliments

La digestion des aliments chez les animaux se déroule en deux phases principales, chacune ayant des conditions de pH distinctes et des types d'enzymes spécifiques qui favorisent la

dégradation des nutriments. Ces phases sont la digestion gastrique et la digestion intestinale, et chacune utilise des diastases (enzymes digestives) adaptées à son environnement.

3.1 Digestion gastrique

La digestion gastrique se déroule en milieu acide, principalement dans l'estomac. Les glandes gastriques sécrètent plusieurs types de diastases qui facilitent la dégradation des aliments :

- La pepsine : C'est l'enzyme principale sécrétée par l'estomac qui dégrade les protéines en polypeptides plus petits. La pepsine fonctionne efficacement dans le milieu acide de l'estomac.
- Chez le veau, des enzymes supplémentaires sont impliquées, comme la présure, qui coagule la caséine du lait, formant un caillé. La catheptase intervient ensuite pour liquéfier ce caillé avant que la pepsine ne puisse l'attaquer. Ces processus sont particulièrement importants pour la digestion du lait chez les jeunes ruminants.

3.2 Digestion intestinale

La digestion intestinale, qui se déroule en milieu plus alcalin, est généralement plus complète que la digestion gastrique. Lorsque le chyme (le mélange semi-liquide d'aliments partiellement digérés) passe de l'estomac à l'intestin, il est neutralisé par la bile, qui est fortement basique. Deux principales séries de diastases sont responsables de la digestion intestinale :

3.2.1 Diastases du suc pancréatique

- L'amylase pancréatique et la maltase : Ces enzymes décomposent l'amidon en maltose, puis le maltose en glucose.
- La lipase pancréatique : Hydrolyse les lipides en acides gras et en monoglycérides.
- La trypsine : Dégrade les polypeptides en acides aminés.

3.2.2 Diastases du suc intestinal

- La saccharase et la lactase : Ces enzymes hydrolysent le saccharose et le lactose, respectivement, en glucose et galactose.
- Une amylase intestinale et une maltase : Continuent la dégradation de l'amidon et du maltose.
- Une lipase intestinale : Continue la dégradation des lipides.
- L'érepsine : Hydrolyse les polypeptides restants en acides aminés.

Ces deux environnements digestifs et leurs diastases respectives travaillent en synergie pour assurer une dégradation efficace des nutriments et leur absorption ultérieure par l'organisme. La digestion gastrique prépare les aliments en les décomposant partiellement dans un environnement acide, tandis que la digestion intestinale, dans un milieu alcalin, permet une dégradation plus approfondie et complète, facilitant ainsi l'absorption des nutriments essentiels.

Particularités chez le veau...

Chez le veau nouveau-né, plusieurs particularités influencent le début et l'efficacité de la digestion, ainsi que l'absorption des nutriments.

D'abord, l'intestin du veau ne commence à sécréter des sucs digestifs qu'entre 24 et 65 heures après la naissance. Ce délai est dû au fait que les glandes digestives du veau ne sont pas encore pleinement développées à la naissance. Par conséquent, dans les premières heures de vie, le système digestif du veau est peu fonctionnel en termes de sécrétion enzymatique et de digestion efficace.

Un phénomène notable durant ces premières heures est la capacité du veau à absorber certaines protéines intactes, sans digestion intestinale préalable. Cette absorption est particulièrement importante pour les globulines immunisantes présentes dans le colostrum, le premier lait maternel sécrété après la naissance. Ces globulines jouent un rôle crucial dans le transfert d'anticorps de la mère au veau, fournissant une protection immunitaire essentielle pendant les premières semaines de vie. La perméabilité intestinale aux protéines du colostrum diminue progressivement au fil des heures après la naissance, ce qui rend cette période critique pour l'absorption des anticorps.

En ce qui concerne la digestion de l'amidon, le veau ne développe pas la capacité à hydrolyser l'amidon de manière efficace avant environ 5 semaines d'âge. Jusqu'à cet âge, la capacité de l'intestin du veau à sécréter les enzymes nécessaires pour décomposer l'amidon est limitée. Par conséquent, l'incorporation de farine ou d'autres sources riches en amidon dans l'alimentation du veau avant cet âge est déconseillée, car ces substrats ne peuvent pas être digérés correctement et peuvent entraîner des problèmes digestifs.

Ainsi, l'alimentation du veau nouveau-né doit être soigneusement adaptée à ses capacités digestives immatures. La transition vers des aliments contenant de l'amidon doit se faire progressivement, en tenant compte du développement progressif du système digestif du veau.

Chapitre 03 : Alimentation énergétique

1. Principes généraux sur l'énergie alimentaire

Les dépenses énergétiques d'entretien et de production sont couvertes grâce à l'apport d'énergie chimique contenue dans la matière organique des aliments ingérés. L'animal se procure l'énergie nécessaire à la couverture des dépenses en utilisant les nutriments issus de la digestion des aliments et de l'absorption, ou ses réserves corporelles en cas de jeûne ou de sous-alimentation.

L'énergie alimentaire est essentielle pour le fonctionnement optimal de l'organisme animal. Elle provient principalement des glucides, des lipides et, dans une moindre mesure, des protéines. Ces macronutriments jouent un rôle central dans le maintien des fonctions physiologiques et sont indispensables à la survie, la croissance, la reproduction et la production des animaux.

L'énergie alimentaire joue plusieurs rôles fondamentaux dans l'organisme :

1. Combustible pour les cellules : L'énergie est nécessaire pour le métabolisme cellulaire, permettant aux cellules de se multiplier, de croître et de se reproduire. C'est la base de toutes les activités biologiques, y compris la réparation et le renouvellement des tissus.
2. Maintien de la température corporelle : L'énergie est essentielle pour maintenir une température corporelle constante, un processus vital chez les animaux à sang chaud (homéothermes). Cela permet de maintenir les enzymes et autres protéines à une température optimale pour leur fonctionnement.
3. Mouvements et travail : L'énergie est utilisée par les muscles pour produire les mouvements nécessaires à la locomotion, à la capture de la nourriture, au travail (dans le cas des animaux de trait), et à toute autre forme d'activité physique.
4. Sécrétions biologiques : L'énergie est également utilisée pour la production de diverses sécrétions corporelles, telles que le lait chez les femelles en lactation, les hormones, les enzymes digestives, et autres substances biologiques essentielles au bon fonctionnement de l'organisme.
5. Soutien des fonctions vitales : L'énergie alimente les processus physiologiques continus tels que la respiration, la circulation sanguine, la digestion, et la filtration rénale, qui sont essentiels à la survie de l'animal.

2. Sources d'énergie alimentaire

L'énergie alimentaire est apportée par trois principales classes de nutriments :

2.1. Glucides

Ils sont la source d'énergie la plus facilement disponible. Les glucides simples, comme le glucose, sont rapidement absorbés et utilisés par l'organisme, tandis que les glucides complexes, tels que l'amidon et la cellulose, nécessitent une dégradation enzymatique ou une fermentation microbienne (chez les ruminants) avant d'être assimilés. Les glucides fournissent l'énergie nécessaire aux fonctions immédiates, comme l'activité musculaire.

2.2. Lipides

Ces molécules fournissent une énergie plus concentrée, avec environ 2,25 fois plus de calories par gramme que les glucides et les protéines. Les lipides sont essentiels pour la constitution des membranes cellulaires, le stockage de l'énergie, et le transport des vitamines liposolubles (A, D, E, K). Ils sont particulièrement importants pour les animaux qui nécessitent une grande réserve d'énergie, comme ceux en période de lactation ou de croissance rapide.

2.3. Protéines

Bien que leur rôle principal soit structurel et fonctionnel, les protéines peuvent aussi être utilisées comme source d'énergie, surtout lorsque les apports en glucides et en lipides sont insuffisants. Les protéines sont décomposées en acides aminés, qui peuvent être convertis en glucose par gluconéogenèse pour fournir de l'énergie.

3. Besoins et dépenses énergétiques de l'organisme

La notion de dépense signifie, en zootechnie, la quantité d'énergie ou de matière (azotée, minérale...) utilisée par un animal pour l'entretien de son organisme ou pour la réalisation de diverses productions.

Les quantités d'éléments nutritifs assimilables nécessaires à toutes ces activités définissent les besoins. Les besoins nutritionnels nets correspondent donc aux dépenses physiologiques de l'animal pour son entretien et ses productions ; dépenses que l'animal couvre à partir des nutriments apportés par la ration.

3.1. Besoin énergétique des animaux

Les besoins énergétiques de l'organisme animal se répartissent en deux grandes catégories : les besoins d'entretien et les besoins de production. Ces besoins reflètent les apports nutritionnels

nécessaires pour maintenir les fonctions vitales et soutenir les différentes phases de la vie, telles que la croissance, la reproduction, et la lactation.

Le besoin d'entretien désigne la quantité d'énergie requise pour assurer les fonctions métaboliques de base, autrement dit le métabolisme basal. Cela inclut les processus essentiels à la survie de l'animal, comme la thermogenèse (régulation de la température corporelle), la respiration, la circulation sanguine, et le maintien de l'intégrité des tissus corporels. Chez l'animal adulte, ce besoin d'entretien englobe également l'énergie nécessaire pour conserver sa masse corporelle, tant en termes de quantité que de qualité, c'est-à-dire en maintenant la composition tissulaire et chimique du corps.

Pour un animal en croissance, le besoin d'entretien est souvent estimé par régression, en cherchant à déterminer la dépense énergétique qui correspondrait à une croissance nulle. Cette estimation prend en compte les dépenses liées à l'ingestion et à la digestion des aliments, ainsi que l'activité physique, comme les déplacements au pâturage. Le besoin d'entretien est proportionnel à la surface corporelle de l'animal et est généralement exprimé en fonction du poids métabolique, calculé en élevant le poids vif à la puissance 0,75 ($P^{0,75}$). Cette relation permet de comparer les besoins énergétiques entre animaux de tailles différentes.

Le besoin de production, quant à lui, couvre les dépenses énergétiques supplémentaires associées aux processus de production spécifiques. Chez un animal en croissance, il s'agit de l'énergie nécessaire pour l'accumulation de la masse corporelle, c'est-à-dire le gain de poids. Chez une femelle en gestation, le besoin de production inclut l'énergie requise pour la conception, le développement du fœtus, et éventuellement, la lactation durant le cycle de production. Ces besoins énergétiques de production sont cruciaux pour assurer la santé et la performance productive des animaux, et varient en fonction de l'état physiologique et des conditions environnementales.

Ainsi, la satisfaction des besoins énergétiques de l'animal est essentielle pour maintenir son bien-être, favoriser une croissance saine, et optimiser la production, qu'il s'agisse de viande, de lait ou d'autres produits animaux. Une alimentation équilibrée et adaptée aux différentes phases de la vie de l'animal est donc fondamentale pour répondre à ces besoins de manière efficace.

3.2. Dépenses d'énergie des animaux

Les dépenses énergétiques des animaux correspondent à une production de matières (fœtus, lait, tissus corporels, œuf, laine) contenant de l'énergie chimique, et à une production de chaleur provenant du fonctionnement de l'organisme.

On peut distinguer trois types de dépenses énergétiques :

✚ La dépense énergétique d'entretien, essentielle au maintien de la vie et au fonctionnement normal de l'organisme dans les conditions d'élevage, sans tenir compte des productions ;

✚ Les dépenses énergétiques de production, correspondant à l'énergie contenue dans les produits ;

✚ La dépense énergétique consécutive à l'utilisation des aliments et des nutriments, permettant de satisfaire les dépenses d'entretien et de production ; elle s'accompagne d'une production de chaleur et est appelée extra-chaleur

Dépense totale en énergie = dépense énergétique d'entretien + dépense énergétique de production + extra-chaleur

L'unité officielle de mesure est le joule (J) ou le kilojoule (kJ), mais on utilise aussi une autre unité, La calorie (cal) ou la kilocalorie (kcal): 1 cal: 4,185J et 1 kcal = 4,185 kJ.

3.2.1. Dépenses d'entretien

La dépense énergétique d'un animal au repos, mesurée à une température correspondant à la zone de neutralité thermique, reflète le métabolisme de base. Dans cette zone, l'organisme ne dépense pas d'énergie supplémentaire pour lutter contre les variations de température, que ce soit pour se réchauffer ou se refroidir. Ce métabolisme de base augmente moins rapidement que le poids vif des animaux, ce qui signifie que les animaux plus grands ont un métabolisme de base proportionnellement plus faible par rapport à leur poids corporel.

La dépense journalière du métabolisme basal se répartit en deux grandes catégories. Environ 50 à 60% de cette dépense est attribuée aux fonctions vitales essentielles, telles que la circulation sanguine, la respiration, l'excrétion rénale, et les sécrétions hormonales et enzymatiques. Les 40 à 50% restants sont consacrés au renouvellement constant des constituants tissulaires et au maintien de l'équilibre chimique intracellulaire, ce qui est crucial pour le bon fonctionnement de l'organisme.

Le métabolisme de base chez l'homme et les espèces domestiques adultes se situe autour de 70 kcal/kg de poids métabolique ($PV^{0,75}$) par jour. Cependant, cette valeur peut varier en fonction de plusieurs facteurs. L'espèce animale est un facteur déterminant : par exemple, le métabolisme basal est de 75 kcal/kg $PV^{0,75}$ chez les bovins, mais seulement de 55 kcal/kg $PV^{0,75}$ chez les ovins. La race joue également un rôle, avec une dépense supérieure de 13% chez les bovins

laitiers comparés aux bovins de race à viande. En outre, des facteurs individuels comme la saison, la lumière et la température influencent également cette dépense énergétique.

Il est important de noter que dans les conditions habituelles d'élevage, un animal n'est jamais placé dans des conditions idéales pour mesurer son métabolisme de base. Il réalise une activité physique et vit dans des conditions climatiques qui peuvent être éloignées du confort thermique. Par conséquent, la dépense énergétique d'un animal à l'entretien ne se limite pas au métabolisme de base, mais inclut également l'énergie supplémentaire nécessaire pour la thermorégulation et l'activité physique. Ainsi, l'entretien énergétique d'un animal peut être exprimé par la somme du métabolisme de base, de l'énergie supplémentaire requise pour maintenir une température corporelle stable, et de l'énergie dépensée lors de ses activités quotidiennes.

Entretien = métabolisme de base + énergie supplémentaire de thermorégulation + activité physique.

a. Effets de l'activité physique

La dépense énergétique de l'animal debout est supérieure d'environ 10% à celle de l'animal couché, sauf chez le cheval pour lequel la station debout est sans conséquence.

L'importance et la nature du déplacement influent également : l'animal en stabulation libre dépense 10% d'énergie calorifique de plus que l'animal attaché ; la collecte de la nourriture sur des parcelles éloignées, difficiles ou peu productives, la dépense est de 20 à 70%.

b. Effets des conditions climatiques : la thermorégulation

La température corporelle d'un animal homéotherme (animal dont la température interne est relativement constante) est régulée par des variations de production de chaleur et par des variations des pertes calorifiques.

- i. Pour lutter contre le froid, l'organisme accroît sa production de chaleur et l'animal essaie de limiter ses pertes calorifiques,
- ii. Pour lutter contre le chaud, l'organisme réduit sa production calorifique et l'animal essaie d'évacuer de la chaleur dans le milieu ambiant.

Si les mécanismes de thermorégulation sont insuffisants, la température corporelle s'éloigne de la température normale. En hypothermie, vers 30 °C, les mécanismes vitaux cessent et la mort intervient à une température proche de 25 °C. En hyperthermie, vers 43 °C chez les mammifères ou 45 °C chez les volailles, le système nerveux est affecté.

Pour chaque espèce, il existe une zone de température, dite de neutralité thermique, dans laquelle la chaleur produite perdue par l'animal est limitée et la quantité d'énergie fixée est maximale, permettant ainsi d'optimiser l'utilisation de l'énergie métabolisable. Les animaux d'élevage doivent donc être élevés dans un environnement dont la température est comprise dans cette zone de neutralité thermique.

Tableau 2: Zone de neutralité thermique de différentes espèces animales

Catégorie d'animaux	Zone de neutralité thermique
Bovins et chevaux	5 à 20 °C
Chèvres	10 à 20 °C
Volailles	15 à 25 °C
Lapins	15 à 18 °C

Les ruminants et les chevaux bénéficient de la chaleur dégagée par les fermentations et supportent bien les basses températures. Les volailles sont dépourvues de glandes sudoripares et luttent difficilement contre une élévation de température.

3.2.2. Dépenses de production

Les produits réalisés peuvent être exportés (lait, œufs, laine) ou stockés au sein de la masse corporelle : tissus adipeux, muscles... (croissance).

Les quantités de lipides, protéines et glucides fixés ou exportés permettent de calculer la quantité d'énergie contenue dans le produit réalisé, c'est-à-dire la dépense de production.

Dépense de production (kcal) = 4,1 * glucides (g) + 5,5 * protéines (g) + 9,4 * lipides (g) .

3.2.2.1. Dépense de lactation

La dépense énergétique liée à la lactation dépend de la quantité de lait produit ainsi que de sa composition, comme l'illustre le tableau suivant.

Tableau 3: Composition moyenne d'un kilogramme de lait de différentes espèces et dépense énergétique associée

	Matières grasses (g)	Protéines (g)	Lactose (g)	Énergie (kcal)
Lait standard de vache	40	31	48	740
Lait de chèvre	35	31	43	676
Lait de brebis	69	56	45	943
Lait de jument	16	25	61	470
Lait de lapine	120	160	20	2 250

3.2.2.2. Dépense de croissance

La dépense de croissance correspond à l'énergie des protéines et des lipides fixés. On néglige l'énergie fixée sous forme de glucides, car les réserves glucidiques corporelles sont faibles. La fixation énergétique s'effectue dans les muscles, les dépôts adipeux, les os, les viscères, la peau, le sang, etc.

Tableau 4: Quantité d'énergie fixée dans le croît de bovins de race, sexe et poids différents (kcal/kg de croît de la masse corporelle)

Poids vif	Race	Charolaise		Frisonne	
		Taurillons	Génisses	Taurillons	Génisses
200 kg		1 700	2 000	2 100	2 600
400 kg		2 400	3 000	3 200	4 100

3.2.2.3. Dépense de gestation

La dépense de gestation correspond à la fixation énergétique par le ou les fœtus, le placenta, les enveloppes, la paroi utérine et la glande mammaire. Elle devient importante au cours du dernier tiers de la gestation.

Par exemple, pour un fœtus ovin simple, pesant 5 kg à la naissance, La fixation n'atteint que 48g de protéines et 300 kcal d'énergie pendant les trois premiers mois de vie utérine. La fixation énergétique évolue rapidement au cours des deux derniers mois.

Tableau 5: Croissance et fixation énergétique dues à la gestation pour une brebis portant un agneau pesant 5 kg à la naissance

	Stade de gestation : semaines avant l'agnelage			
	- 8 et - 7	- 6 et - 5	- 4 et - 3	- 2 et - 1
Croissance (g/j)	85	120	140	175
Dépôt de protéines (g/j)	7	11	21	29
Dépôt de lipides (g/j)	-	2	2,5	6,5
Énergie fixée (kcal/j)	50	85	150	220

3.2.2.4. Dépense de reconstitution des réserves corporelles

Chez les femelles en lactation, les réserves corporelles mobilisées participent à la couverture de la dépense énergétique lorsque l'apport énergétique est inférieur à la dépense. La reconstitution des réserves est nécessaire pour aborder un nouveau cycle de production.

L'accroissement de la masse corporelle est surtout réalisé par une accumulation de lipides. Un kilogramme de gain de masse corporelle correspond à une fixation énergétique de 7 500 kcal chez la vache laitière.

3.2.2.5. Dépense de production d'œufs

L'œuf entier de poule a la constitution moyenne suivante : coquille 9%, albumen 61%, vitellus 30%. La partie comestible d'un œuf de poule de 60 g est composée en moyenne de 40 g d'eau, 6,7 g de protéines, 6,5 g de lipides, 0,2 g de glucides et 0,5 g de minéraux. Il contient environ 100 kcal, soit 1,6 kcal/g d'œuf.

3.2.2.6. Dépense de production de laine et de poils

Cette dépense atteint un niveau faible, par exemple 17 kcal/j pour la production annuelle d'un kilogramme de laine mohair par une chèvre angora, ou 55 kcal/j pour la production annuelle d'une toison de 4 kg par un mouton mérinos.

3.2.3. Dépense d'extra-chaleur

La production totale de chaleur par l'organisme animal provient de deux sources principales. D'une part, il y a le dégagement calorifique associé au fonctionnement des muscles et des organes qui assurent les fonctions vitales, tels que le maintien en vie, les déplacements, et la thermorégulation. Cette énergie thermique est appelée la chaleur d'entretien.

D'autre part, une chaleur supplémentaire est produite au cours et à la suite des repas. Ce dégagement de chaleur est le résultat du fonctionnement de l'appareil digestif et des cellules qui utilisent les nutriments pour l'entretien de l'organisme et pour la production. Cette source de chaleur est connue sous le nom d'extra-chaleur d'entretien et de production.

La production totale de chaleur peut donc être résumée par l'équation suivante : extra-chaleur totale = extra-chaleur d'entretien + extra-chaleur de production.

4. Utilisation de l'énergie alimentaire par l'organisme

Les cellules de l'organisme ont besoin d'énergie et de matériaux pour se renouveler, se multiplier ou produire, elles disposent pour cela des nutriments résultant de l'absorption et des métabolites issus de la mobilisation des réserves corporelles.

L'utilisation de l'énergie alimentaire par l'organisme se divise en deux grandes phases : l'utilisation digestive et l'utilisation métabolique.

Utilisation digestive : Cette première étape concerne la transformation des aliments ingérés en nutriments assimilables. Lors de la digestion, les macronutriments (glucides, lipides, et protéines) sont décomposés en molécules plus simples comme les sucres, les acides gras, et les acides aminés. Cette décomposition permet l'absorption des nutriments par les parois de

l'intestin et leur passage dans le sang. C'est ici que l'énergie potentielle contenue dans les aliments commence à être mise à disposition de l'organisme.

Utilisation métabolique : Une fois les nutriments absorbés, ils sont transportés vers les cellules où ils sont utilisés pour produire de l'énergie à travers divers processus métaboliques. Le catabolisme transforme ces molécules en énergie utilisable sous forme d'ATP (adénosine triphosphate), qui alimente les fonctions cellulaires vitales comme la contraction musculaire, la régulation de la température corporelle, et la synthèse de nouvelles molécules. Parallèlement, l'anabolisme utilise une partie de cette énergie pour construire et réparer les tissus corporels, synthétiser des protéines, et stocker l'excès d'énergie sous forme de glycogène ou de graisse.

5. Mesure du métabolisme

La mesure du métabolisme est essentielle pour évaluer les besoins énergétiques des animaux et comprendre leur utilisation de l'énergie alimentaire. Deux méthodes principales sont employées pour mesurer la production de chaleur, indicateur clé du métabolisme : la calorimétrie directe et la calorimétrie indirecte.

5.1.Méthode de calorimétrie directe

La calorimétrie directe consiste à placer l'animal dans un calorimètre, un appareil conçu pour mesurer directement la quantité de chaleur produite par l'organisme. Cette chaleur est quantifiée en mesurant l'élévation de la température de l'eau utilisée pour refroidir le calorimètre. Cette méthode offre une mesure précise de la chaleur totale produite, mais elle est peu utilisée en raison de la complexité et de la taille imposante des installations nécessaires, surtout pour accueillir des animaux de grande taille.

5.2.Méthode de calorimétrie indirecte

La calorimétrie indirecte évalue la production de chaleur par des méthodes indirectes, telles que:

Échanges gazeux : On estime la production de chaleur à partir de la consommation d'oxygène (O_2) et de la production de dioxyde de carbone (CO_2) par l'animal. Cette méthode repose sur la relation entre l'oxydation des nutriments et la production d'énergie.

Bilan carbone-azote : Cette méthode calcule la différence entre la quantité d'énergie métabolisable ingérée par l'animal et l'énergie fixée (énergie des productions). L'énergie fixée est estimée en déterminant les quantités de carbone et d'azote retenues par l'organisme, en soustrayant les pertes (dans les fèces, les urines et les gaz) des quantités ingérées.

Méthode des abattages : On mesure la quantité d'énergie fixée par l'animal en comparant son contenu énergétique au début et à la fin d'une période d'observation. Cette comparaison est faite par la combustion des produits dans une bombe calorimétrique, ou en analysant leur composition chimique.

Ces méthodes indirectes sont utilisées en raison de leur flexibilité et de leur applicabilité à différents types d'animaux, offrant ainsi une évaluation pratique et relativement précise du métabolisme énergétique.

6. Différentes étapes de l'utilisation de l'énergie des aliments

L'utilisation des aliments par les animaux s'accompagne de nombreuses transformations dans l'appareil digestif puis dans les tissus. Les composants organiques sont dégradés progressivement et chaque étape entraîne des pertes organiques et calorifiques ; elles sont très variables selon les aliments et les animaux.

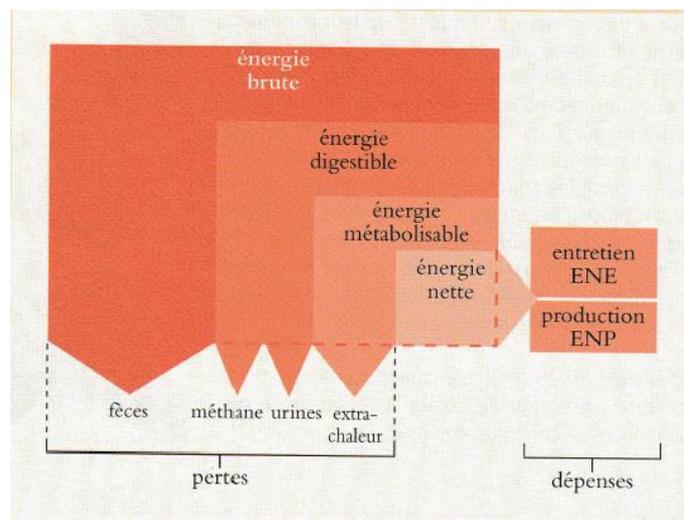


Figure 21: Différentes étapes de l'utilisation de l'énergie des aliments.

6.1.Énergie brute (EB)

L'énergie brute est la quantité d'énergie contenue dans l'aliment. Elle est déterminée par combustion d'un échantillon dans une bombe calorimétrique, ou par estimation à partir de la composition chimique de l'aliment.

$$EB = 4134 + 14,73 \text{ MAT} + 52,39 \text{ MG} + 9,25 \text{ CB} - 44,60 \text{ MM} + \Delta$$

6.2.Énergie digestible (ED)

L'énergie digestible est obtenue par différence entre l'énergie brute et l'énergie contenue dans les matières organiques fécales (EF) :

$$ED = EB - EF.$$

La digestibilité de l'énergie (dE) est le rapport entre l'énergie digestible et l'énergie brute :

$$dE = ED / EB ; ED = EB \times dE.$$

6.3.Énergie métabolisable (EM)

L'énergie métabolisable est égale à l'énergie digestible diminuée de l'énergie contenue dans les gaz combustibles, surtout le méthane, issus des fermentations digestives (EG) et de l'énergie contenue dans les urines (EU) : $EM = ED - EG - EU$; $EM = EB - (EF + EG + EU)$.

L'énergie métabolisable correspond à la quantité d'énergie alimentaire utilisable par les tissus de l'organisme. Elle sert à faire face aux dépenses énergétiques liées à l'entretien et à la production.

$$EM \text{ totale (ou EMT)} = EM \text{ entretien} + EM \text{ production.}$$

6.4.Énergie nette (EN)

Une partie seulement de l'énergie métabolisable contribue à couvrir les dépenses d'entretien et de production : c'est l'énergie nette. L'autre partie est dissipée sous forme de chaleur, c'est l'extra-chaleur :

$$EN = EM - \text{extra-chaleur} \text{ ou } EN = k \times EM.$$

k est le rendement global de la transformation de l'énergie métabolisable en énergie nette :

$$K = EN / EM$$

On obtient l'énergie nette à partir de l'énergie brute des aliments en tenant compte de l'ensemble des pertes énergétiques facilement mesurables (fèces, urines et gaz) et des pertes calorifiques d'extra-chaleur :

$$EN = EB - (EF + EU + EG) - \text{extra-chaleur}$$

Les pertes d'extra-chaleur sont très variables selon la fonction physiologique réalisée par l'animal et la composition des aliments. On est conduit à caractériser chaque fonction par son rendement k. Par exemple, pour l'entretien, k_m (m = maintenance) = "EN utilisée pour l'entretien" / "EM utilisée pour l'entretien". De même, on peut définir k_l (l = lactation) pour la lactation, k_f (f = fattening) pour l'engraissement, etc.

Fonctions physiologiques :

- L'entretien : La valeur du rendement k_m est élevée, comprise entre 0,70 et 0,80 selon les espèces et les régimes.

- La lactation : Le rendement k_l est assez peu variable quelle que soit la source énergétique, il est proche de 0,60 chez la vache et de 0,65 chez la jument.
- L'engraissement : Le rendement pour la fixation lipidique est plus élevé : 0,60 chez les bovins.
- Les autres fonctions : Les rendements k sont évalués à 0,60 à 0,70 pour la ponte, 0,10 à 0,28 pour le travail, 0,18 pour la production de laine, 0,10 à 0,30 pour la gestation

7. Facteurs de variation du rendement de l'énergie métabolisable en énergie nette

Le rendement de l'énergie métabolisable (EM) en énergie nette (EN) n'est pas constant et peut varier en fonction de plusieurs facteurs. Comprendre ces facteurs est crucial pour optimiser la gestion nutritionnelle des animaux et maximiser l'efficacité énergétique de l'alimentation.

7.1. Influence de la matière sèche

La teneur en matière sèche de l'aliment joue un rôle important dans le rendement de l'énergie métabolisable en énergie nette. Un aliment à haute teneur en matière sèche peut nécessiter plus d'énergie pour la digestion et l'absorption, ce qui réduit le rendement énergétique net. Inversement, un aliment à faible teneur en matière sèche est plus facilement digestible, augmentant ainsi le rendement énergétique. Cependant, il est essentiel de noter que l'excès de matière sèche peut également limiter la consommation d'aliment, en raison d'une sensation de satiété accrue chez l'animal, ce qui influence indirectement le rendement énergétique global.

7.2. Influence de la durée de consommation

La durée de consommation d'un aliment peut également affecter le rendement de l'énergie métabolisable en énergie nette. Une consommation prolongée d'un aliment particulier peut entraîner des adaptations métaboliques chez l'animal, telles qu'une modification de l'efficacité de la digestion ou de l'utilisation des nutriments. Par exemple, une ration alimentaire consommée sur une longue période peut entraîner une amélioration de la capacité digestive et de l'absorption des nutriments, augmentant ainsi le rendement énergétique net. À l'inverse, une variation fréquente de l'alimentation peut perturber ces processus, réduisant ainsi le rendement énergétique.

Ces facteurs soulignent l'importance de la formulation et de la gestion des rations alimentaires pour maximiser l'efficacité énergétique, en tenant compte des caractéristiques spécifiques des aliments et de la manière dont ils sont consommés par les animaux.

8. Systèmes d'expression

En pratique, on peut distinguer :

✚ Les animaux qui reçoivent des aliments de nature et de composition très différentes (fourrages, concen-trés), conduisant de ce fait à des pertes énergétiques très variables ; on utilise alors un système basé sur l'énergie nette. C'est le cas des ruminants et des chevaux.

✚ Les animaux qui ingèrent des rations moins hétérogènes et ont des pertes (EF, EG, EU et extra-chaleur) moins variables ; on utilise alors des systèmes fondés sur l'énergie métabolisable ou l'énergie digestible. C'est le cas des veaux laitiers de boucherie et des volailles pour les-quels on adopte l'énergie métabolisable, et des lapins pour lesquels on retient l'énergie digestible.

8.1.Systèmes utilisant l'énergie digestible ou l'énergie métabolisable

Les mesures de digestibilité de l'énergie ou des teneurs en énergie digestible (ED) ou en énergie métabolisable (EM) sont relativement simples à réaliser chez les animaux. La mesure de l'énergie des urines est toutefois plus délicate ; celle des gaz de fermentation également (nécessitant de disposer de chambres respiratoires). Cette dernière est peu pratiquée pour les volailles, les lapins, espèces pour lesquelles l'énergie perdue sous forme de méthane est négligeable. Dans le cas particulier des volailles, les urines et les matières fécales sont mélangées dans les fientes au niveau du cloaque, et on raisonne alors en énergie métabolisable.

En pratique, le système basé sur la teneur en EM est plus utilisé que celui basé sur la teneur en ED, car il permet notamment de prendre en compte les pertes d'énergie associées au catabolisme des protéines et, par conséquent, d'améliorer la précision de la valeur énergétique des aliments, notamment ceux qui sont riches en protéines.

Les besoins en énergie, exprimés sur la base des teneurs en ED ou en EM, se résument le plus souvent, pour des espèces comme le poulet ou le lapin, en termes de teneur en ED ou en EM de l'aliment distribué (ad libitum) aux animaux. Le choix de la concentration en énergie dépend de facteurs liés à l'animal (génotype, sexe, poids vif, etc.), à l'environnement climatique, ou à des considérations économiques (coût et disponibilité des sources énergétiques). Les besoins en énergie peuvent aussi se décliner en plans d'apport énergétique, ceux-ci étant la résultante d'approches empiriques ou, à l'inverse, d'approches analytiques dans lesquelles les besoins en énergie nette (entretien et production) et les rendements moyens d'utilisation de l'ED ou de l'EM sont pris en compte.

À titre d'exemple de cette dernière approche, et même si le système basé sur la teneur en ED est de moins en moins utilisé chez le porc, le besoin en énergie d'une truie en lactation est la somme de son besoin d'entretien (110 kcal d'ED par kilo de PV^{0,75}) et du besoin pour la production de lait, égal à 1140/0,72/0,96, soit 1650 kcal d'ED par kilo de lait, où 1140, 0,72, et 0,96 correspondent respectivement à la teneur en énergie du lait, au rendement, et au rapport EM/ED chez la truie en lactation.

8.2. Systèmes utilisant l'énergie nette

8.2.1. Ruminants

La figure présente les variations des rendements k_m (entretien), k_l (lactation) et k_f (engraissement) en fonction du rapport $q = EM/EB$.

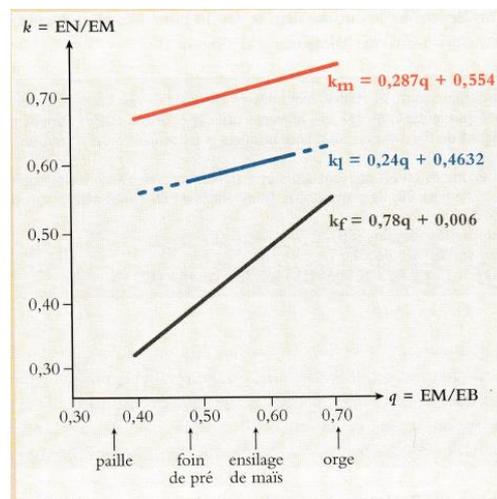


Figure 22: Variations des rendements k_m , k_l et k_f en fonction du rapport $q = EM/EB$.

On constate que : quel que soit l'aliment, $k_m > k_l > k_f$; les deux droites correspondant à k_m et k_l sont sensiblement parallèles, il existe donc un rapport constant entre k_m et k_l ($k_m/k_l \approx 1,2$) pour tous les aliments ; le rendement k_f varie très fortement selon les aliments

Compte tenu des différences de rendements d'utilisation de l'énergie métabolisable selon les fonctions physiologiques, on peut définir au moins trois valeurs énergétiques nettes pour chaque aliment :

- EN d'entretien = $EM \times k_m$;
- EN de lactation = $EM \times k_l$;
- EN d'engraissement = $EM \times k_f$

8.2.1.1. Système UFL-UFV, le principe général

Le mode d'expression de la valeur énergétique des aliments par rapport à celle d'un aliment de référence, l'orge, est particulièrement intéressant en pratique. Il évite de parler de calories ou d'autres unités d'énergie souvent trop profondes pour les utilisateurs, et se réfère à la valeur énergétique de l'orge dite « de référence », appelée unité fourragère (UF).

L'unité fourragère est la valeur en énergie nette d'un kilogramme brut d'orge de référence. On a :

$$\text{Valeur énergétique d'un aliment (UF)} = \frac{\text{énergie nette de l'aliment (kcal)}}{\text{énergie nette d'un kilogramme d'orge de référence (kcal)}}$$

8.2.1.2. Système des unités fourragères lait (UFL) et viande (UFV)

Dans la pratique, deux fonctions biologiques différentes au moins sont réalisées par un même animal, l'importance relative de ces deux fonctions pouvant en outre varier dans de larges proportions. Pour simplifier et éviter de multiplier le nombre de valeurs énergétiques d'un aliment, on a retenu dans le système français deux situations, chacune suffisamment représentative :

- Une combinaison entretien + lactation (système « lait ») ;
- Une combinaison entretien + engraissement (système « viande »).

Le système « lait » est utilisé pour les femelles en lactation, gestantes ou tarées, les femelles d'élevage, les animaux à l'entretien et les animaux réalisant une croissance modérée ;

Le système « viande » est utilisé pour les bovins et les agneaux ayant une croissance élevée. (1000g/j chez un bovin)

Compte tenu des deux systèmes retenus, on a donc deux unités fourragères correspondant aux valeurs énergétiques nettes de l'orge de référence :

- Dans le système « lait », l'unité fourragère « lait » (UFL) ;
- Dans le système « viande », l'unité fourragère « viande » (UFV).

Chaque aliment a deux valeurs énergétiques, rapportées à celles de l'orge de référence et exprimées en UFL et en UFV. Les apports alimentaires recommandés sont exprimés en UFL ou en UFV, suivant le type d'animal considéré.

Le système UFL : L'UFL est la valeur énergétique nette de lactation (EN_L) d'un kilogramme brut d'orge de référence distribué à une femelle laitière dont on a couvert la dépense d'entretien. Cette énergie est exportée dans le lait. Elle correspond à 1700 kcal d' EN_L « 1 UFL = 1700 kcal d' EN_L ».

Le système UFV : L'UFV est utilisé pour des animaux à croissance intensive. est la valeur énergétique nette de l'engraissement (EN_f) d'un kilogramme brut d'orge de référence. Elle correspond à 1820 kcal d' EN_F « 1 UFV = 1820 kcal d' EN_F ».

8.2.2. Chevaux

L'unité fourragère cheval (UFC) : L'UFC est la quantité d'énergie nette apportée par un kilogramme brut d'orge de référence, distribué à un cheval à l'entretien.

1UFC = 2 250 kcal d'EN.

Chapitre 04 : Alimentation azotée

Introduction

Les dépenses azotées d'entretien et de production sont assurées par l'utilisation d'acides aminés, seule forme azotée utilisable par les cellules animales. L'expression des apports et des besoins azotés est fonction de l'espèce considérée et dépend essentiellement des pertes d'azote et de la précision de leur estimation.

L'alimentation azotée présente par ailleurs des différences importantes chez les monogastriques et les polygastriques.

1. Place des matières azotées en nutrition animale

Les matières azotées jouent un rôle fondamental dans la nutrition animale en tant que sources primaires de protéines, indispensables à la croissance, à la reproduction et à la production des animaux d'élevage. Ces protéines sont essentielles pour la synthèse des tissus musculaires, la formation des enzymes, et la production des hormones, contribuant ainsi à des fonctions vitales variées. Elles sont présentes sous diverses formes dans l'organisme, comme les tissus corporels, les caséines du lait ou encore l'albumine de l'œuf, et représentent environ 21 % de la masse corporelle délipidée chez les ruminants et les chevaux.

La qualité des matières azotées est déterminée par leur teneur en acides aminés, qui doivent être disponibles en proportion adéquate pour satisfaire les besoins nutritionnels des animaux, qu'ils soient monogastriques ou ruminants. Une gestion précise de l'apport en matières azotées est essentielle pour maintenir un équilibre métabolique optimal, éviter les effets négatifs des excès ou des carences, et assurer la santé, la productivité et la longévité des animaux tout en minimisant les impacts environnementaux liés à l'excrétion d'azote.

2. Rôle des matières azotées dans l'organisme

Les matières azotées sont des substances plastiques dont le rôle principal est l'élaboration des protéines de constitution de l'organisme, des productions ou des protéines fonctionnelles (enzymes, hormones, anticorps, etc.).

L'autre rôle des matières azotées est la fourniture d'énergie lorsque les acides aminés absorbés dépassent les possibilités de synthèses protéiques de l'organisme. Dans ce cas, les acides aminés

non fixés sont dégradés avec production d'énergie et d'azote, ce dernier étant éliminé sous forme d'urée principalement dans l'urine, mais aussi dans la salive, le lait, la sueur et les sécrétions utérines.

Les acides aminés sont les principaux produits issus de la digestion des protéines ; ils serviront aux synthèses des protéines animales.

3. Effets d'excès et de carence des matières azotées

L'équilibre des matières azotées dans l'alimentation des animaux est crucial pour maintenir leur santé et optimiser leurs performances. Tant un excès qu'une carence en azote peuvent entraîner des conséquences graves pour les animaux, affectant leur appétit, leur croissance, leur production, et même leur survie.

3.1.Carence en matières azotées

Une carence en matières azotées dans l'alimentation se traduit par un apport insuffisant en protéines ou en acides aminés essentiels. Cela a plusieurs effets négatifs sur la santé et les performances des animaux :

- Réduction de l'appétit : Une carence en protéines diminue l'appétit des animaux, ce qui entraîne une consommation insuffisante de nourriture. Cela crée un cercle vicieux, car moins l'animal mange, moins il reçoit de nutriments, aggravant ainsi la carence.
- Diminution des performances : La carence en azote entraîne une baisse des performances de production, qu'il s'agisse de la croissance (chez les animaux en croissance), de la production de lait (chez les ruminants), ou de la ponte (chez les volailles). Cela est dû au fait que les protéines sont essentielles à la synthèse des tissus, à la production de lait et à la formation des œufs.
- Détérioration de l'indice de consommation (IC) : L'indice de consommation, ou efficacité alimentaire, se détériore en cas de carence en protéines. Les animaux doivent consommer plus de nourriture pour maintenir leur poids et leur production, ce qui n'est souvent pas possible, entraînant une inefficacité croissante dans l'utilisation des aliments.
- Amaigrissement : En l'absence de protéines suffisantes, le corps de l'animal commence à mobiliser ses propres réserves de protéines, entraînant une perte de poids importante. Cette mobilisation des protéines corporelles se produit souvent aux dépens des muscles, ce qui affaiblit encore plus l'animal.

- Risque de mort : Dans les cas extrêmes, une carence sévère et prolongée en matières azotées peut conduire à la mort des animaux, en raison d'une malnutrition sévère et de l'épuisement des réserves corporelles.

3.2.Excès de matières azotées

À l'inverse, un excès de matières azotées dans l'alimentation présente également des risques pour la santé des animaux. L'apport en azote doit être ajusté avec précision pour éviter des surcharges qui peuvent provoquer des déséquilibres métaboliques :

- Modification du faciès microbien intestinal : Un excès de protéines, en particulier chez les ruminants, peut entraîner une perturbation de la flore microbienne dans le rumen ou l'intestin. Cela peut provoquer une dysbiose, où les bactéries bénéfiques sont surpassées par des bactéries pathogènes, entraînant des troubles digestifs comme des ballonnements, de la diarrhée ou une diminution de la digestion des nutriments.
- Fatigue hépatique et rénale : Le foie et les reins sont les principaux organes responsables de l'élimination de l'excès d'azote sous forme d'urée. Un apport excessif en protéines met ces organes sous une pression excessive, ce qui peut conduire à une fatigue hépatique (difficulté à métaboliser l'azote) et à une fatigue rénale (difficulté à excréter l'urée). À long terme, cela peut provoquer des lésions ou des maladies rénales et hépatiques.
- Alcalose sanguine : Un excès d'azote peut également perturber l'équilibre acido-basique du sang, conduisant à une alcalose métabolique. Cela se produit lorsque le corps compense l'excès d'ammoniaque en augmentant le pH sanguin, ce qui peut entraîner des troubles métaboliques graves, tels que des crampes musculaires, des troubles cardiaques, et une diminution de l'efficacité des processus biologiques.

Maintenir un équilibre approprié des matières azotées dans l'alimentation des animaux est essentiel pour leur santé et leur performance. La gestion rigoureuse de l'apport en azote permet de prévenir les risques liés aux carences et aux excès, assurant ainsi une production animale efficace et durable.

4. Dépenses azotées de l'organisme

L'apport azoté dans l'alimentation des animaux est nécessaire du fait de dépenses azotées résultant :

- ✚ Des pertes inévitables liées à l'entretien, c'est-à-dire au renouvellement constant des tissus de l'organisme et à la synthèse de substances liées à son fonctionnement ;
- ✚ De l'exportation des protéines des produits : gain de poids, fœtus, lait, œuf, laine.

4.1. Dépenses azotées d'entretien

Les cellules de l'organisme sont en perpétuel renouvellement ; à cela s'ajoutent des synthèses permanentes de protéines liées à son fonctionnement. Il en résulte des pertes obligatoires de substances azotées que l'on retrouvera en majeure partie dans les urines.

4.2. Dépenses azotées de production

4.2.1. Croissance

Le dépôt azoté quotidien est la résultante des dépôts dans les différents compartiments corporels: muscle, os, graisse, peau, sang. Son importance est fonction :

- De la croissance, elle-même liée à l'âge, au type génétique, au sexe ;
- Du mode d'alimentation, à volonté ou limité ;
- Des conditions d'élevage et de production, du poids et de l'âge d'abattage.

4.2.2. Gestation

La dépense azotée de gestation correspond aux matières azotées fixées dans l'utérus, par le ou les fœtus et les annexes. Ces dépôts sont globalement faibles, ils interviennent essentiellement en fin de gestation.

4.2.3. Lactation

La dépense azotée de lactation varie d'abord avec :

Espèce animale : Par exemple, le taux azoté du lait varie de 25 g/kg chez la jument à 160 g/kg pour la lapine. Pour une espèce donnée, la dépense azotée de lactation varie avec :

Race : le taux azoté (ou taux protéique) du lait de vache varie selon les types génétiques de 30 à 40 g/ kg

Tableau 6: Valeur protéique du lait selon la race bovine laitière

Races bovines	Taux protéique (g/kg de lait)
Prim'Holstein	31,9
Montbéliarde	32,7
Normande	34,4
Jersiaise	38,3

Stade de lactation : au cours de la lactation, les teneurs en matières grasses, matières azotées et énergie évoluent en sens inverse de la quantité de lait.

4.2.4 Production d'œufs

Les œufs sont riches en matières azotées, environ 12 % de leur poids. La ponte d'un œuf de 60 g représente donc une dépense de 7 g de matières azotées, soit 3,5 fois les dépenses azotées d'entretien d'une poule de 2,5 kg.

4.2.5 Production de laine

La laine est un tissu de composition complexe où prédomine la kératine, riche en acides aminés soufrés. La kératine contient 14 % de cystéine. Si cet acide aminé est insuffisamment présent dans l'alimentation, il peut constituer un facteur limitant de la pousse de la laine ou des poils chez les animaux à fourrure.

4.2.6 Travail musculaire

Les dépenses azotées liées au travail musculaire augmentent moins vite que les dépenses énergétiques. Mais elles peuvent augmenter plus rapidement si les apports énergétiques sont insuffisants dans le cas d'efforts très intenses. L'animal utilise alors des protéines musculaires à des fins énergétiques.

5. Couverture des dépenses azotées

5.1 Classification nutritionnelle des acides aminés

En effet, dans toutes les espèces, la synthèse cellulaire des protéines suppose la présence simultanée et en quantités adéquates de vingt acides aminés : glycocolle, alanine, sérine, thréonine, valine, leucine, isoleucine, acide aspartique, acide glutamique, acide hydroxyglutamique, arginine, lysine, cystéine, méthionine, phénylalanine, tyrosine, tryptophane, histidine, proline et hydroxyproline.

A. Acides aminés essentiels ou indispensables. Ils sont au nombre de dix dans la plupart des cas, parmi lesquels on distingue :

- ✚ Acides aminés essentiels au sens strict qui doivent être obligatoirement présents dans la ration, car l'animal est absolument incapable de les synthétiser. Ce sont la lysine et la thréonine pour toutes les espèces.
- ✚ Acides aminés essentiels au sens large dont la synthèse à partir d'autres acides aminés est possible, mais trop faible pour assurer les besoins de l'animal. Ce sont le plus souvent

: l'arginine, la méthionine, l'histidine, la phénylalanine, l'isoleucine, le tryptophane, la leucine, la valine.

- ✚ Acides aminés semi-indispensables, ils peuvent être synthétisés à partir d'acides aminés indispensables. C'est le cas de la cystéine et de la tyrosine qui peuvent être fabriquées respectivement à partir de la méthionine et de la phénylalanine.

B. Acides aminés banals : L'organisme animal est capable de les fabriquer à partir d'autres acides aminés. Leur carence dans la ration n'a pas de répercussions défavorables, car ils sont synthétisés en quantité et vitesse suffisantes. Cependant, leur apport alimentaire ne doit pas être négligé, car ils économisent les acides aminés essentiels. Les aliments en sont tous largement pourvus, qu'ils soient d'origine végétale ou animale ; il suffit d'un taux minimal de matières azotées pour les apporter en quantité suffisante.

Cette distinction entre acides aminés essentiels et banals présente un caractère général, mais elle peut cependant varier, en particulier avec l'espèce animale.

- ✚ Chez les volailles et le lapin, la liste ci-dessus est généralement admise ; le glycolle est considéré comme semi-indispensable chez les volailles et le lapin.
- ✚ Chez les ruminants, il existe les mêmes besoins cellulaires en acides aminés essentiels. Ils sont le plus souvent satisfaits par la protéosynthèse microbienne, à l'exception des animaux à performances élevées comme la vache laitière à haute production dont la production de protéines du lait peut être limitée par un apport insuffisant de la ration en méthionine et en lysine.

5.2. Notion de facteur limitant

L'acide aminé, dont la quantité insuffisante limite la protéosynthèse cellulaire, est appelé le facteur limitant.

La synthèse protéique au niveau cellulaire nécessite l'apport simultané de l'ensemble des acides aminés indispensables ou non, en proportion équilibrée nécessaire à cette synthèse. Un seul acide aminé indispensable ou semi-indispensable manquant limite la protéosynthèse : il devient facteur limitant de la production. Il conditionne la quantité de protéines fabriquées (GMQ, quantité de lait).

Un exemple théorique simplifié peut illustrer cette notion de facteur limitant. La protéine cellulaire à synthétiser est composée de 3 acides aminés a, b, c dans les proportions 9a, 5b, 3c.

Tableau 7: Effets de la distribution de quatre protéines alimentaires sur la protéosynthèse et l'excrétion urinaire d'azote

Protéine	Acides aminés constitutifs			Protéosynthèse	Excrétion urinaire d'azote
	9a	5b	3c		
Protéine cellulaire	9a	5b	3c		
Protéine alimentaire					
p1	9a	5b		0	++++
p2	9a	5b	1c	+	+++
p3	9a	5b	2c	++	++
p4	9a	5b	3c	++++	0

La distribution de protéines alimentaires p1, p2, p3, p4, dont la composition en acides aminés se rap-proche progressivement de celle de la protéine cellulaire, conduit à une amélioration progressive de la protéosynthèse et à une réduction de l'excrétion urinaire d'azote. L'acide aminé c est facteur limitant des protéines p 1, p2, p3 ; il ne l'est plus pour la protéine p4.

5.3. Utilisation des matières azotées alimentaires

Les matières azotées alimentaires ne sont que partiellement utilisées par l'animal. Les rejets azotés contenus dans les déjections correspondent à la fraction de l'azote alimentaire non utilisé par l'animal. Les constituants qui se dégradent sont éliminés selon deux voies principales :

- ✚ L'urine est la voie principale d'élimination des déchets azotés chez les monogastriques : 60 % chez les oiseaux.
- ✚ La voie fécale prédomine chez les ruminants (70 à 80 %).

Ces deux catégories de rejets correspondent aux deux étapes de l'utilisation des apports alimentaires : l'utilisation digestive de l'azote et l'utilisation métabolique des acides aminés sanguins.

- A. Utilisation digestive de l'azote des aliments** conduit à l'élimination au niveau fécal de la fraction azotée non digérée ; l'importance relative de cette fraction par rapport à l'azote ingéré dépend à la fois de l'espèce animale et des aliments constituant la ration.
- B. Utilisation métabolique des acides aminés** traduit la part des acides aminés sanguins fixés pour la synthèse protéique. Elle a pour conséquence une excrétion d'azote au niveau urinaire, principalement sous forme d'urée issue de l'oxydation des acides aminés sanguins non utilisés pour la synthèse protéique. L'importance de cette fraction dépend de l'adéquation quantitative (apport de matières azotées totales) et qualitative (apport d'acides aminés) de l'apport azoté aux besoins de l'animal.

5.4.Importance des pertes d'azote

L'importance des pertes d'azote peut être caractérisée à deux niveaux distincts.

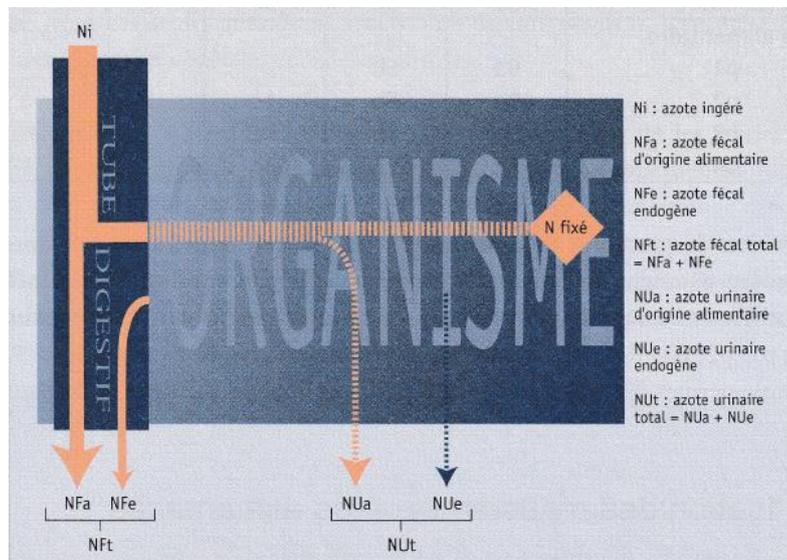


Figure 23: Utilisations digestive et métabolique de l'azote alimentaire

5.4.1 Au niveau digestif

Par la digestibilité apparente d_a (ou le coefficient d'utilisation digestive apparent (CUDa) et par la digestibilité réelle d_r (ou le coefficient d'utilisation réel, CUDr). On détermine les valeurs des digestibilités grâce aux formules suivantes :

$$d. \text{ apparente} = d_a = \frac{N \text{ ingéré} - N \text{ fèces}}{N \text{ ingéré}} = \frac{N_i - N_f}{N_i}$$

$$d. \text{ réelle} = d_r = \frac{N \text{ ingéré} - (N \text{ fèces total} - N \text{ fèces endogène})}{N \text{ ingéré}} = \frac{N_i - (N_{ft} - N_{fe})}{N_i} = \frac{N_i - N_{fa}}{N_i}$$

Le CUD, ou coefficient d'utilisation digestive, est égal à : $CUD (\%) = d_a \times 100$

5.4.2 Au niveau métabolique

Par le coefficient d'utilisation métabolique, CUM. Il permet de connaître la qualité des matières azotées, c'est-à-dire l'équilibre en acides aminés de l'aliment par rapport aux besoins de l'animal.

En effet, ce coefficient se calcule selon la formule suivante :

$$CUM = \frac{N \text{ fixé}}{N \text{ absorbé}}$$

6. Mode d'expression des apports et des besoins

Tout système d'expression de la valeur azotée des aliments et des besoins azotés des animaux doit vérifier simultanément deux conditions :

- Permettre d'exprimer dans une même unité apports et besoins ;
- Retenir un même niveau d'expression pour la valeur azotée des aliments et pour les besoins des animaux.

Le niveau retenu peut être :

- Le niveau cellulaire où a lieu la dépense
- Le niveau de l'absorption intestinale ;
- Le niveau de l'apport des matières azotées alimentaires.

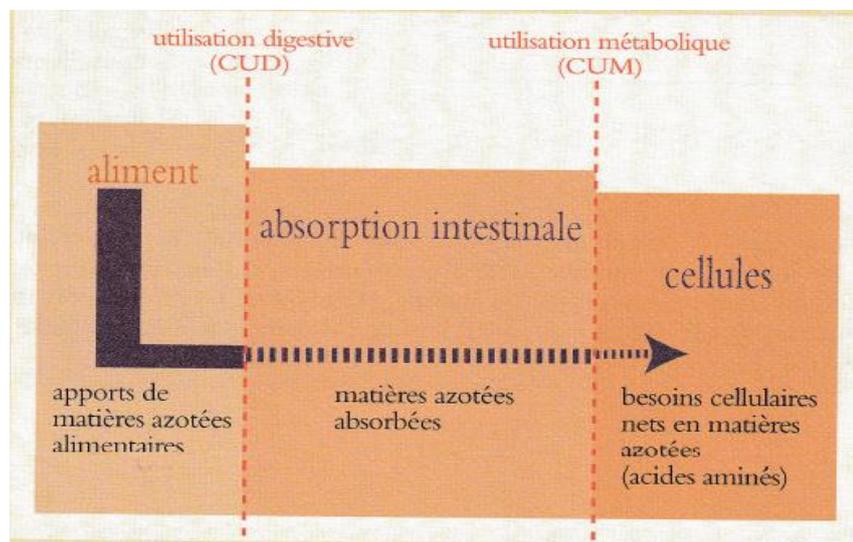


Figure 24: Niveaux d'expression des apports et des besoins azotés

Le choix d'un niveau d'expression est différent selon l'espèce ; il dépend principalement :

- ✚ De la plus ou moins grande variabilité des pertes d'azote consécutives soit à l'utilisation digestive, soit à l'utilisation métabolique ;
- ✚ De la possibilité de connaître ou d'estimer assez précisément ces pertes selon les aliments ou les caractéristiques des animaux.

6.1. Chez les monogastriques (volailles, lapins)

L'utilisation digestive est assez peu variable et l'utilisation métabolique dépend principalement de l'apport en acides aminés essentiels. Le niveau retenu est le niveau de l'apport ou celui de l'absorption ; la valeur des aliments et les besoins sont exprimés en matières azotées totales ou protéines brutes et en acides aminés indispensables (ou essentiels) digestibles.

6.2. Chez les ruminants

Les fermentations dans le rumen-réseau jouant un rôle déterminant dans l'utilisation digestive des matières azotées alimentaires, un système basé sur l'expression des apports et des besoins en matières azotées totales (MAT), c'est-à-dire exprimé au niveau de l'ingestion, est nettement insuffisant dans ce cas. En effet, il faut tenir compte :

- De la digestibilité des matières azotées ingérées, très variable suivant les aliments ;
- Des remaniements subis par les matières azotées alimentaires dans le rumen-réseau.

Dans ces conditions, le niveau d'expression retenu est logiquement celui de l'absorption.

Le système des protéines digestibles dans l'intestin ou système PDI. Tient compte de la digestibilité réelle des matières azotées dans l'intestin, mais aussi des remaniements des matières azotées dans le rumen.

Cependant, pour des productions élevées, certains acides aminés peuvent devenir limitants : ainsi, chez la vache laitière, il existe des besoins élevés en lysine et en méthionine dans le cas de fortes productions. Cela conduit à exprimer des besoins en certains acides aminés essentiels: AADI (acides aminés digestibles dans l'intestin).

6.3. Chez les chevaux

Le niveau de l'absorption est également privilégié, la valeur des aliments et les apports recommandés étant exprimés en matières azotées digestibles pour le cheval (MADC). La valeur MADC tient compte à la fois :

- De la teneur en matières azotées totales (MAT) des aliments ;
- De la digestibilité apparente des matières azotées totales dans l'intestin grêle et le gros intestin (dN) ;
- Du taux de récupération des acides aminés (d'origine microbienne ou alimentaire) absorbés au niveau du gros intestin. Ce taux est exprimé par un coefficient K.

$$\text{MADC d'un aliment} = \text{MAT} \times \text{dN} \times \text{K}.$$

Voici quelques exemples de valeurs de K :

- Pour les concentrés, K = 1;
- Pour les fourrages verts, K = 0,90;
- Pour les fourrages déshydratés et les foins, K = 0,85;
- Pour les ensilages de bonne qualité, K = 0,7.

7. Alimentation azotée des ruminants

L'alimentation azotée des ruminants repose sur deux données essentielles :

- Les cellules des tissus des ruminants ont les mêmes besoins en acides aminés que celles des monogastriques ;
- Les acides aminés absorbés au niveau de l'intestin ont une double origine : les acides aminés alimentaires issus des protéines alimentaires non dégradées dans le rumen, et les acides aminés microbiens issus des protéines microbiennes formées dans le rumen-réseau

7.1. Utilisation digestive des matières azotées

7.1.1. Transformations subies par les matières azotées dans le rumen-réseau

7.1.1.1. Dégradation des matières azotées alimentaires, la protéolyse microbienne

La dégradation des matières azotées dans le rumen est une protéolyse microbienne dont le produit est essentiellement l'ammoniac (NH_3). La dégradation des matières azotées en ammoniac est estimée à l'aide de tests de dégradabilité qui permettent d'obtenir la dégradabilité théorique, ou DT, à partir de laquelle on peut estimer avec une bonne précision le flux des matières azotées dégradées et non dégradées.

7.1.1.2. Devenir des matières azotées dégradées : synthèse des protéines microbiennes (protéosynthèse)

Pour réaliser leur propre synthèse de protéines (protéosynthèse) et ainsi assurer leur prolifération, les bactéries du rumen utilisent essentiellement :

- L'énergie et les chaînes carbonées fournies par les glucides fermentescibles ;
- L'ammoniac issu de la protéolyse des matières azotées dégradables.

L'importance de la protéosynthèse microbienne est proportionnelle à la quantité de l'élément dont la concentration dans le milieu ruminal est la plus faible. Cet élément est le facteur limitant de la protéosynthèse (énergie ou NH_3).

7.1.2. Transformations subies par les matières azotées après le rumen-réseau

7.1.2.1. Dans la caillette et l'intestin grêle

Sous l'action des enzymes protéolytiques des sucs digestifs, toutes les protéines, d'origine alimentaire ou microbienne, fournissent des acides aminés qui sont absorbés. L'azote microbien représente plus de la moitié du flux d'azote entrant dans le duodénum (50 à 90 %).

7.1.2.2. Dans le gros intestin

Il y a une reprise de l'activité microbienne avec protéolyse et synthèse microbienne, mais la quantité d'acides aminés absorbés à ce niveau est très faible.

7.2. Utilisation métabolique des acides aminés absorbés

Les acides aminés ont, chez le ruminant, une double origine :

- Une origine alimentaire, la digestion des protéines non dégradées dans le rumen (AAa)
- Une origine microbienne, la digestion des protéines microbiennes provenant de la protéosynthèse (AAm).

En comparant la composition en acides aminés des matières azotées des aliments, des animaux et des microorganismes, on comprend que, dans la plupart des cas, les ruminants ne sont pas tributaires d'un apport alimentaire en acides aminés indispensables.

Tableau 8: Composition en acides aminés en g pour 16 g d'azote des matières azotées des aliments, des microorganismes du rumen et des tissus

	Aliments		Microorganismes rumen		Tissus	
	Orge	Luzerne	Bactéries	Protozoaires	Lait	Muscle
Lysine	3,8	4,3	7,2	9,5	8,5	9,45
Méthionine	1,6	1,4	2,2	2,0	2,6	2,8
Cystéine	2,5	1,3	1,0	1,45	0,9	1,3

8. Système des protéines digestibles dans l'intestin grêle (PDI)

L'abréviation PDI est la contraction d'une expression plus exacte et plus explicite : protéines vraies réellement digestibles dans l'intestin grêle. Le système PDI exprime les apports alimentaires et les besoins des animaux au niveau de l'absorption des acides aminés dans l'intestin grêle.

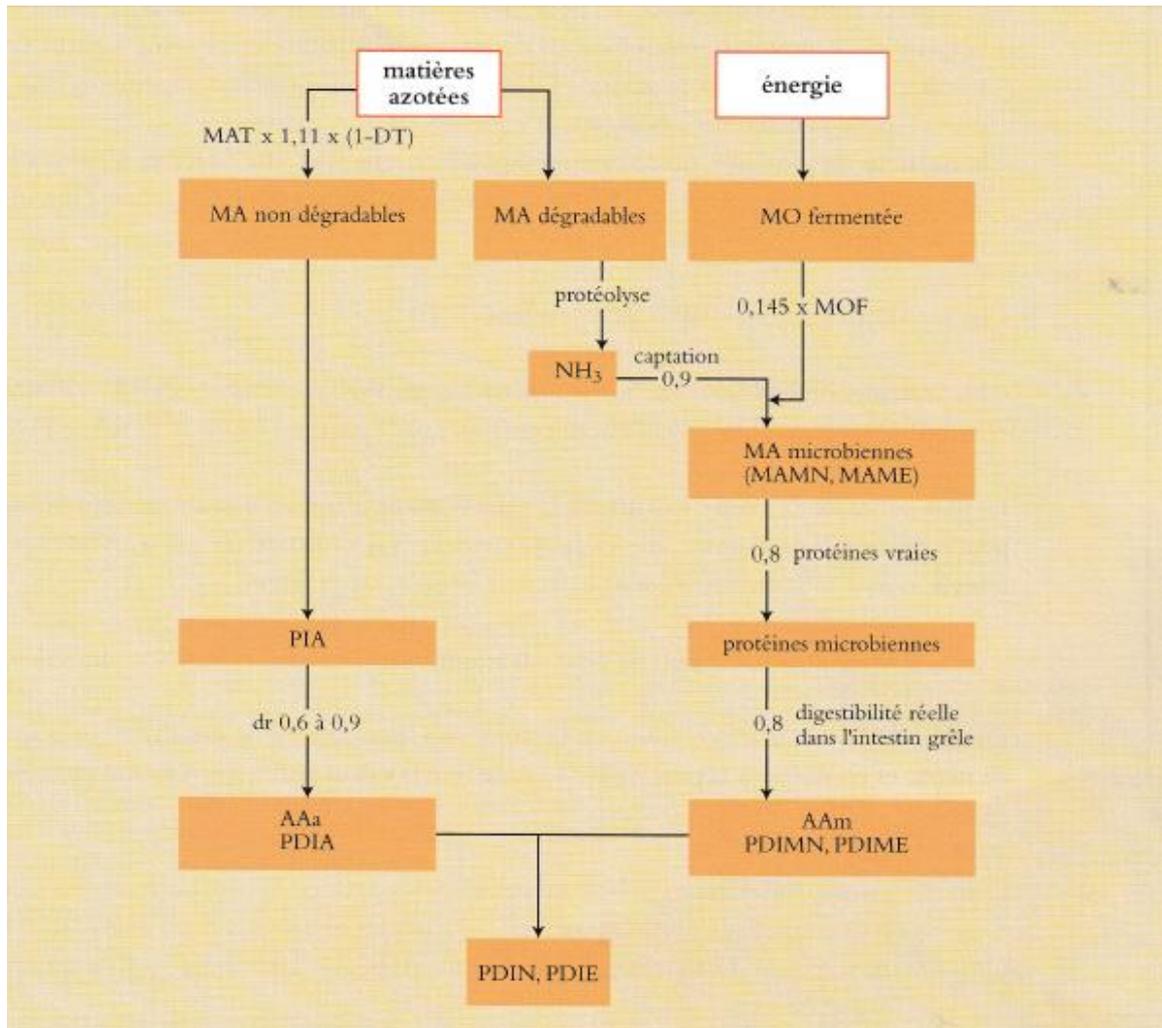


Figure 25: Principe de la détermination du système PDI

8.1.Expression de la valeur azotée

La valeur azotée d'un aliment est exprimée en PDI. Ce système d'unité prend en compte le devenir des matières azotées alimentaires et de celles remaniées dans le rumen. Cette valeur est la somme de deux fractions :

- i. Les protéines réellement digestibles dans l'intestin grêle d'origine alimentaire ou **PDIA**. Ce sont les acides aminés réellement absorbés provenant des protéines alimentaires non dégradées dans le rumen (**AAa**) ;
- ii. Les protéines réellement digestibles dans l'intestin grêle d'origine microbienne ou **PDIM**. Ce sont les acides aminés réellement absorbés provenant des protéines microbiennes issues de la protéosynthèse (**AAm**).

La valeur PDI d'un aliment est donc : $PDI = PDIA + PDIM$

C'est-à-dire $IAA = AAa + AAm$

8.1.1. Mécanisme des facteurs limitants : l'énergie ou l'azote fermentescibles

En tenant compte des deux principaux facteurs limitants de la protéosynthèse, l'énergie fermentescible et les matières azotées dégradables, on peut distinguer en théorie deux valeurs PDIM :

- La quantité de protéines microbiennes digestibles, qui peut être obtenue à partir de l'énergie fermentescible disponible ; c'est la valeur PDIME de l'aliment (protéines digestibles dans l'intestin d'origine microbienne permise par l'énergie) ;
- La quantité de protéines microbiennes digestibles, qui peut être obtenue à partir de l'azote dégradable disponible ; c'est la valeur PDIMN de l'aliment (protéines digestibles dans l'intestin d'origine micro-bienne permise par l'azote).

Premier cas : la ration apporte plus d'énergie fermentescible que l'azote dégradable : l'azote dégradable est le facteur limitant, et la valeur azotée de la ration s'exprime en PDIN

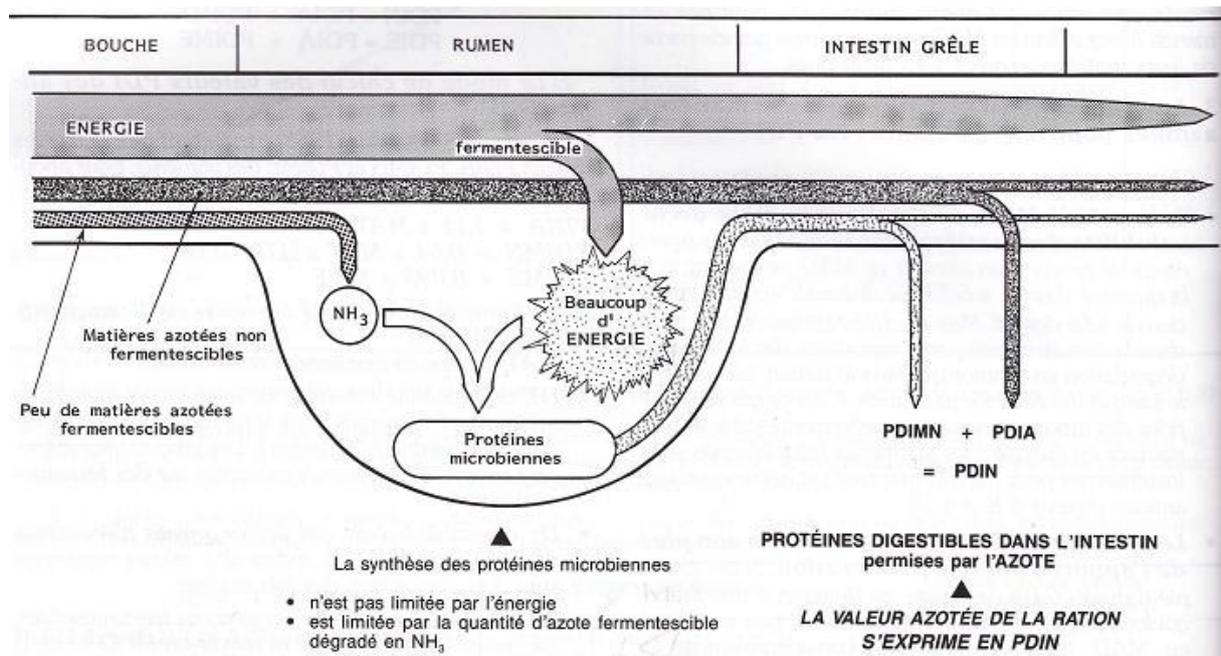


Figure 26: Premier cas l'azote dégradable est le facteur limitant

Deuxième cas : la ration apporte moins d'énergie fermentescible que l'azote fermentescible : l'énergie fermentescible est le facteur limitant, et la valeur azotée de la ration s'exprime en PDIE

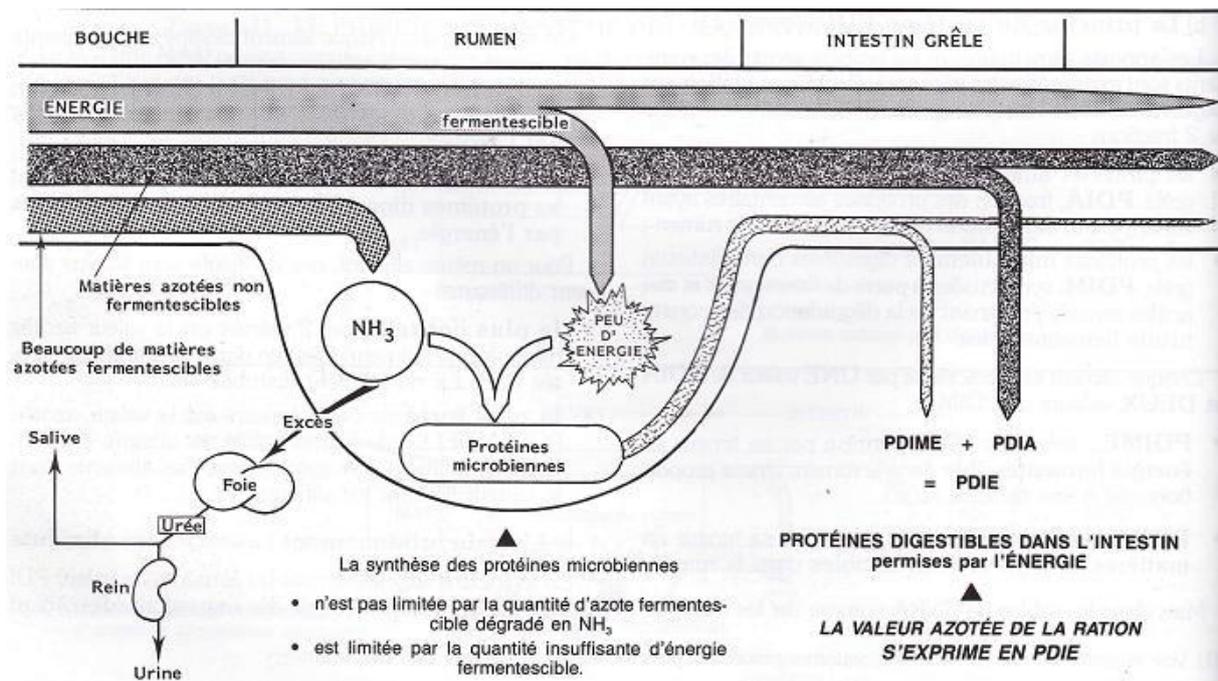


Figure 27: Deuxième cas l'Énergie fermentescible est le facteur limitant

Chaque aliment a donc deux valeurs azotées PDI :

- ✚ Les protéines digestibles dans l'intestin permises par l'azote : $\text{PDIN} = \text{PDIA} + \text{PDIMN}$;
- ✚ Les protéines digestibles dans l'intestin permises par l'énergie : $\text{PDIE} = \text{PDIA} + \text{PDIME}$.

La plus petite de ces deux valeurs est la valeur azotée effective de l'aliment distribué seul. La plus forte peut être considérée comme une valeur potentielle, valeur maximale qui n'est atteinte que si l'aliment est associé avec d'autres aliments dont le facteur limitant est différent.

8.1.2. Principe de la détermination des valeurs PDI des aliments

- ✚ Le calcul des valeurs PDI d'un aliment

Les valeurs PDI d'un aliment sont obtenues à partir de quatre caractéristiques :

- La teneur en matières azotées totales (MAT) ;
- La dégradabilité théorique (DT) des matières azotées ;
- La teneur en matière organique fermentescible (MOF) ;
- La digestibilité réelle (dr) des acides aminés d'origine alimentaire.

- ✚ Le calcul de la valeur PDIA

La dégradabilité théorique (DT) surestime la dégradation réelle des matières azotées. On estime qu'à l'entrée de l'intestin les protéines non dégradées, ou protéines intestinales d'origine alimentaire (PIA), représentent 1,11 fois celles qui sont calculées à partir de la DT :

$$PDIA = 1,11 \times MAT \times (1 - DT) \times dr.$$

✚ Le calcul de la valeur PDIM

Les protéines microbiennes arrivant dans l'intestin (PIM) représentent 80% des matières azotées microbiennes (MAM). Leur digestibilité réelle est en moyenne de 0,80. On peut donc écrire :

$$- PIM = 0,8 \times MAM;$$

$$- PDIM = 0,80 \times 0,80 \times MAM = 0,64 MAM.$$

✚ Deux estimations des quantités de matières azotées microbiennes sont possibles.

SI l'estimation est faite en tenant compte du facteur limitant matière azotée dégradable, la quantité de protéines digestibles dans l'intestin d'origine microbienne permise par l'azote, PDIMN,

$$PDIMN = 0,64 MAT \times (DT - 0,10).$$

SI l'estimation est faite en tenant compte du facteur limitant énergie fermentescible, la quantité de protéines digestibles dans l'intestin d'origine microbienne permises par l'énergie, PDIME,

$$PDIME = 0,8 \times 0,8 \times 0,145 MOF.$$

8.2. Valeurs azotées des aliments

La plupart des aliments ont des valeurs PDIN et PDIE différentes. On peut distinguer :

✚ Les aliments dont la valeur PDIE est supérieure à la valeur PDIN : pailles, fourrages de mauvaise qualité, racines, pulpes, ensilages de maïs, céréales. Les matières azotées dégradables sont alors le facteur limitant de la protéosynthèse. Ce sont, en outre, tous des aliments dont le taux azoté est faible ($MAT < 12\%$ de la matière sèche) ;

✚ Les aliments dont la valeur PDIN est supérieure à la valeur PDIE : certains fourrages récoltés jeunes, ou à base de légumineuses, protéagineux, tourteaux et quelques coproduits comme les drêches. L'énergie fermentescible est alors le facteur limitant de la protéosynthèse. Ils ont, en outre, tous un taux élevé de matières azotées ($MAT > 14\%$ de la matière sèche).

8.3. Art du rationnement : associer les aliments

En associant judicieusement les aliments de valeurs PDI différentes, l'excédent d'énergie des uns valorise l'excédent de matières azotées fermentescibles des autres. Le but recherché est que les différents aliments de la ration atteignent leur valeur azotée potentielle pour maximiser la valeur azotée de la ration. Il est toujours possible, à partir de deux aliments aux caractéristiques différentes, d'obtenir une combinaison telle que la somme des apports PDIN soit égale à la somme des apports PDIE.

Tableau 9: Valeurs PDI et valeur azotée de deux aliments (orge et tourteau de colza) et de trois associations de ces deux aliments (e/kg brut)

	PDIN (en g)	PDIE (en g)	Valeur PDI retenue (en g)
Orge	69	87	69
90 % orge + 10 % tourteau colza	84	92	84
82 % orge + 18 % tourteau colza	96	96	96
50 % orge + 50 % tourteau colza	144	112	112
Tourteau colza	219	138	138

8.4. Intérêts du système PDI : La complémentation azotée des rations

La comparaison des besoins des animaux en UF et PDI et des apports de la ration de base en UF, PDIN et PDIE permet de déterminer la quantité et la composition de l'aliment concentré à distribuer, sachant que l'optimum est d'obtenir un équilibre entre les apports UF, PDIN et PDIE de la ration totale.

L'alimentation azotée des microorganismes du rumen : Une alimentation azotée correcte doit satisfaire les besoins azotés des microorganismes tout en couvrant les besoins azotés du ruminant.

- ✚ Une multiplication optimale des micro-organismes favorise une efficacité maximale de la digestion. Cela se traduit par trois conséquences : la synthèse des acides aminés microbiens pour nourrir l'animal en azote, l'amélioration de la digestibilité et de la valeur énergétique de la ration, ainsi que la facilitation du passage des particules alimentaires vers l'estomac grâce à une rumination correcte, ce qui augmente les quantités ingérées quotidiennement.

- ✚ Les deux facteurs limitants principaux de la protéosynthèse doivent être disponibles simultanément et en quantités adéquates.

C'est ce que le système PDI traduit, au niveau d'une ration équilibrée, par l'égalité $PDIN = PDIE$. Il est assez souvent difficile d'obtenir strictement cette égalité, ne pas trop s'en écarter est un objectif plus réaliste.

IL est possible de nuancer ces conditions d'équilibre, à condition que l'apport de PDIE soit conforme aux recommandations.

- **PDIN < PDIE**

On peut tolérer, dans certaines conditions, un déficit d'apport PDIN relativement à l'apport de PDIE sans effet trop négatif sur la production, la digestibilité et le niveau d'ingestion de la ration. En effet, le recyclage de l'urée endogène par voie salivaire contribue pour une part quelquefois importante à la fourniture d'azote aux microorganismes.

Le déficit tolérable en PDIN est exprimé, pour la pratique du rationnement, en grammes de (PDIE- PDIN) par UFL il dépend :

- Du type de production et de la situation physiologique de l'animal ;
- Des caractéristiques de la ration.

Ce « déficit tolérable » est précisé lors du rationnement des différentes catégories de ruminants

- **PDIN > PDIE**

L'excès de PDIN est éliminé sous forme d'urée dans l'urine. S'il est trop important, il se traduit par un gaspillage d'azote. On peut alors envisager une source azotée moins dégradable.

En outre, dans le cas d'utilisation d'azote non protidique, il ne faut pas dépasser le seuil de toxicité qui, pour l'urée, est atteint à la suite d'une ingestion rapide, en une seule fois, d'environ 50 g/100 kg de poids vif (30 g/100 kg de poids vif chez la vache laitière).

8.5.Limites du système PDI

Chez les vaches laitières, l'utilisation du système PDI (PDIN, PDIE) ne permet pas d'optimiser les rations au niveau de la couverture des besoins azotés, surtout chez les fortes productrices.

La synthèse microbienne (PDIM) ne permet de couvrir qu'une partie des besoins des vaches laitières en acides aminés, le reste devant être couvert par des acides aminés d'origine alimentaire (PDIA). Ce qui implique de connaître la valeur PDIA des aliments. En effet, pour une vache laitière, la production de 30 kg de lait est couverte par environ 50% de PDIA (AAa) et 50 % de PDIM (AAm).

Il est donc important d'apporter des matières azotées de qualité (riches en protéines), dont une partie est non dégradée dans le rumen et fournit des acides aminés alimentaires (PDIA), d'où un choix judicieux des aliments azotés dans les rations.

9. Traitements technologiques améliorant la valeur azotée des aliments

Dans le cas d'animaux ayant des besoins élevés (vaches laitières fortes productrices en début de lactation), la production de PDIM n'est pas suffisante, tant en quantité qu'en qualité (acides aminés essentiels), Pour améliorer la valeur azotée de la ration, il faut donc augmenter l'apport de PDIA; la connaissance de la valeur PDIA des aliments, en particulier des concentrés, permet alors de réaliser un choix judicieux du concentré azoté complémentaire selon les caractéristiques de la ration de base à corriger. La figure ci-dessous montre que les valeurs PDIA des aliments, données par les tables de la valeur nutritive des aliments, sont très variables d'un aliment à un autre.

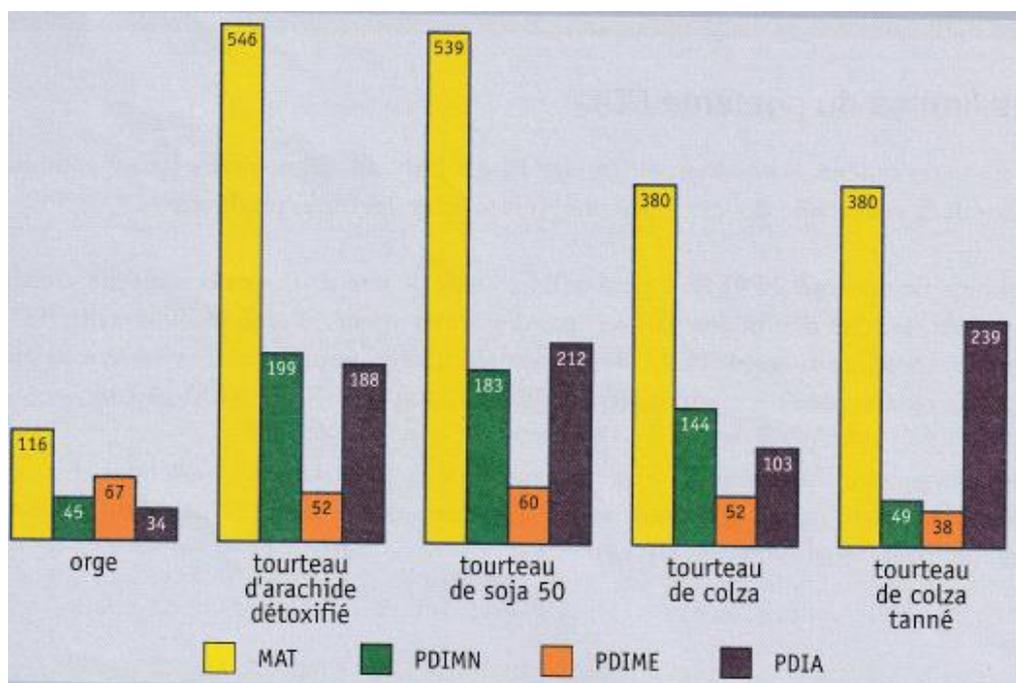


Figure 04 : Compositions de quelques aliments concentrés (g/kg MSJ)

9.1. Dans le cas des tourteaux, le tannage

Est un traitement technologique qui permet de diminuer la dégradabilité des protéines et donc d'augmenter leur valeur PDIA.

Alors que les tourteaux ont des valeurs PDIN supérieures voire très supérieures à leur valeur PDIE, Les valeurs PDIN et PDIE sont comparables après tannage. L'intérêt du tannage est encore accru dans le cas où les protéines des tourteaux, ainsi protégées par le tannage, sont riches en acides aminés essentiels.

Le tannage est principalement assuré par l'incorporation de formol à raison de 3 à 4 g par kg de matière première tannée. C'est actuellement la technologie la plus efficace.

9.2. Dans le cas de l'ensilage d'herbe

Et plus particulièrement de Luzerne, pour améliorer la qualité de l'aliment, on peut également utiliser un conservateur à base d'acide formique, favorisant l'acidification, et de formol ; celui-ci diminue la dégradabilité des protéines et joue donc le même rôle que le tannage dans le cas des tourteaux.

10. Besoins en PDI de différentes espèces de poly-gastriques

10.1. Besoins des bovins

10.1.1. Besoin d'entretien journalier (BesPDI_{Ent})

Le besoin d'entretien journalier (BesPDI_{Ent}) augmente avec le poids vif de la vache, et n'est pas modulé par l'activité.

$$\text{BesPDI}_{\text{Ent}} = 3,25 \times \text{PV}^{0,75}$$

10.1.2. Besoins de croissance

Chez les primipares et plus généralement chez les vaches dont l'âge (Âge, en mois) est inférieur à 40, le besoin protéique de croissance (BesPDI_C) est à ajouter au besoin d'entretien.

$$\text{BesPDI}_{\text{C}} = 422 - (10,4 \times \hat{\text{Age}}).$$

10.1.3. Besoin de production

Les besoins protéiques liés à la production de lait (BesPDI_{PL}) sont calculés à partir des protéines secrétées dans le lait. Le rendement de conversion des protéines métabolisables en protéines secrétées dans le lait est estimé à 64 %. De ce fait, le besoin en protéines d'un kilo de lait standard à 31 g de protéines est égal à environ 48 g PDI/kg lait.

$$\text{BesPDI}_{\text{PL}} = \frac{\text{PL} \times \text{TP}}{0,64}$$

10.1.4. Besoin de gestation

Les besoins de gestation (BesPDI_G) sont faibles, mais augmentent rapidement au cours des trois derniers mois, passant en moyenne de 45 à 230 g PDI/j.

$$\text{BesPDI}_{\text{G}} = 0,07 \times \text{PV}_{\text{nais}} \times e^{0,111 \times \text{SemG}}$$

10.1.5. Besoins protéiques totaux journaliers

Les besoins protéiques totaux journaliers (BesPDI en g/j) d’une vache laitière peuvent donc être calculés en additionnant les besoins d’entretien, de croissance, de production et de gestation à l’aide de l’équation suivante :

$$\text{BesPDI} = \text{BesPDI}_{\text{Ent}} + \text{BesPDI}_{\text{C}} + \text{BesPDI}_{\text{PL}} + \text{BesPDI}_{\text{G}}$$

10.2. Besoins en PDI des ovins

10.2.1. Besoins d’entretien

Les besoins en protéines digestibles dans l’intestin (PDI) pour une brebis en entretien sont calculés selon la formule suivante :

$$\text{BesPDI (g/j)} = 2,5 \times \text{PV}^{0,75}$$

10.2.2. Besoins de gestation

Pendant les trois premiers mois de gestation, les besoins en PDI restent relativement stables par rapport à ceux d’une brebis en entretien, en raison de la croissance modeste du ou des fœtus. Cependant, au cours des deux derniers mois de gestation, les besoins en PDI augmentent de manière significative, surtout chez les brebis prolifiques, alors que leur capacité d’ingestion demeure stable.

Tableau 10: Apports recommandés totaux et capacité d’ingestion des brebis en fin de gestation selon le poids des brebis et le poids de la portée.

Poids de la brebis ^a (kg)	Poids de la portée (kg) et (taille) ^b	Semaines avant l’agnelage												
		- 6 et - 5				- 4 et - 3				- 2 et - 1				- 6 à - 1 Capacité d’ingestion (UEM)
		UFL (f/j)	PDI (g/j)	Ca _{abs} (g/j)	P _{abs} (g/j)	UFL (f/j)	PDI (g/j)	Ca _{abs} (g/j)	P _{abs} (g/j)	UFL (f/j)	PDI (g/j)	Ca _{abs} (g/j)	P _{abs} (g/j)	
55	4 (1)	0,74	74	1,7	1,9	0,84	93	2,1	2,1	0,99	107	2,7	2,4	1,29
	5 (2)	0,75	79	1,9	2,0	0,89	103	2,3	2,2	1,09	118	3,1	2,6	1,16
	7 (2)	0,77	89	2,2	2,2	0,97	113	2,7	2,5	1,24	139	3,9	3,0	1,29
60	5 (2)	0,80	83	1,9	2,2	0,93	107	2,4	2,4	1,13	121	3,2	2,8	1,26
	6 (2)	0,81	88	2,1	2,2	0,97	112	2,6	2,5	1,21	132	3,5	2,9	1,32
	7 (2)	0,82	93	2,2	2,3	1,02	117	2,8	2,6	1,30	143	4,0	3,2	1,40
	8 (2)	0,83	98	2,4	2,3	1,07	122	3,0	2,8	1,38	154	4,4	3,4	1,45
70	5 (1)	0,88	90	2,1	2,5	1,02	114	2,6	2,7	1,22	129	3,3	3,1	1,64
	7 (2)	0,90	100	2,4	2,6	1,09	133	3,0	2,9	1,37	150	4,1	3,5	1,58
	9 (2)	0,93	111	2,7	2,8	1,14	146	3,5	3,2	1,50	172	5,0	3,9	1,71
	11 (3)	0,96	121	3,0	2,9	1,24	169	4,0	3,4	1,63	188	5,7	4,3	1,65

10.2.3. Besoins de production

Les besoins énergétiques pour la production de lait sont calculés en fonction d’un lait standard (PLS), dont la composition est estimée à partir de la relation suivante :

$$\text{PLS} = \text{PL} \times [(0,0071 \times \text{TB}) + (0,0043 \times \text{TP}) + 0,2224]$$

Les besoins en PDI sont déterminés par la formule :

$$\text{BesPDI} = (2,5 \times \text{PV}^{0,75}) + [(\text{PL} \times \text{TP}) / 0,58]$$

où TB et TP sont les taux de matière grasse et de protéines, respectivement, exprimés en g/l.

10.2.4. Agneau à l'engrais

Pour les agneaux à l'engrais, la ration doit contenir plus de 0,8 UFV et 135 g de PDI par kg de matière sèche en début de croissance, puis 95 g de PDI par kg par la suite, soit une moyenne de 120 g de PDI par kg de matière sèche.

10.3. Besoins en PDI des caprins

Les besoins quotidiens en protéines, liés à l'entretien, et exprimés en grammes de PDI/j (BesPDI), sont résumés dans l'équation suivante : $\text{BesPDI} = 50 + 0,62 (\text{PV} - 60)$

Les besoins de production sont : $\text{BesPDI} = 45 \text{ PL}35$.

Pour les animaux en gestation, il est recommandé de multiplier le besoin d'entretien en PDI par 1,6 et 2,2 aux 4^{ème} et 5^{ème} mois pour tenir compte des besoins utérins accrus.

Chapitre 05 : Alimentation minérale et vitaminique

I. Alimentation minérale

1. Aperçu introductif sur l'importance des minéraux chez les animaux d'élevage

Tous les êtres vivants contiennent des proportions variables d'éléments minéraux, dont certains sont essentiels à la réalisation des fonctions biologiques vitales. Un élément est considéré comme indispensable lorsque son absence ou insuffisance dans le régime alimentaire entraîne des perturbations métaboliques, parfois graves. Ces dysfonctionnements cessent généralement avec l'ajout de l'élément manquant dans l'alimentation.

Chez les animaux d'élevage, les minéraux jouent un rôle crucial dans le maintien de la santé et de la productivité. Ils interviennent dans une multitude de processus physiologiques, notamment la formation des os, la régulation enzymatique, et le maintien de l'équilibre électrolytique. Par exemple, un bovin adulte contient plusieurs kilogrammes de calcium, essentiel à la constitution osseuse, mais seulement quelques milligrammes d'iode ou de cobalt, qui sont néanmoins indispensables à des fonctions vitales comme la régulation hormonale et la production de vitamine B12.

Les éléments minéraux sont classés en deux catégories principales : les éléments majeurs (ou macroéléments) et les oligoéléments (ou éléments trace). Les macroéléments, présents en grandes quantités dans l'organisme, comprennent le calcium, le phosphore, le potassium, le sodium, le chlore, le magnésium et le soufre. Leur apport alimentaire s'exprime généralement en grammes par kilogramme de matière sèche (g/kg MS) de la ration. Les oligoéléments, en revanche, sont présents en très faibles quantités et leur apport se mesure en milligrammes par kilogramme de matière sèche (mg/kg MS) ou en parties par million (ppm). Parmi les plus importants figurent le fer, le zinc, le cuivre, le manganèse, le sélénium, et l'iode.

La répartition des minéraux dans le corps est également inégale. Environ 83 % des minéraux se trouvent dans les os, 10 % dans les muscles, et les 7 % restants dans la peau, le sang, le cerveau, et les viscères. Cette distribution reflète l'importance de la fonction structurale des minéraux dans le corps, notamment dans le squelette, qui renferme à lui seul plus de 80 % des matières minérales de l'organisme.

Les minéraux peuvent être présents dans l'organisme sous forme de sels (comme les chlorures, carbonates, phosphates, et sulfates) ou intégrés dans des molécules organiques (comme les acides nucléiques, les hormones, et l'hémoglobine). L'équilibre et la disponibilité de ces minéraux sont essentiels pour garantir une croissance saine, une bonne reproduction, et une production optimale chez les animaux d'élevage.

2. Rôles des éléments minéraux dans l'organisme

Les deux grands rôles des matières minérales :

2.1 Des éléments "plastiques" qui construisent organisme et ses productions

Les éléments majeurs et certains oligo-éléments se combinent aux substances carbonées pour l'élaboration de nombreuses substances organiques :

- ✚ Le squelette, représentant 10 % du poids du corps, est constitué de 2/3 de matières minérales. Celles-ci représentent 99 % du calcium de l'organisme et 80 % du phosphore
- ✚ Les liquides internes (sang et lymphe) contiennent 8 à 9 pour mille de sels minéraux dissous : chlorure de sodium, sels de calcium, phosphates, carbonates et bicarbonates alcalins... Ces sels minéraux participent aux grandes fonctions vitales : absorption cellulaire, élimination du CO_2 .
- ✚ Les productions (lait, œufs, laine, fœtus...) exportent toutes d'importantes quantités de substances minérales.

2.2 Des régulateurs des fonctions de l'organisme

Les éléments minéraux, surtout les oligo-éléments, mais aussi des éléments majeurs, entrent dans la constitution moléculaire des enzymes, des hormones, et de certaines vitamines. Ces trois séries de substances organiques, tantôt commandent, tantôt régularisent les grandes fonctions de l'organisme : digestion, croissance, productions, reproduction.

C'est pourquoi la carence de ces minéraux, comme celle de certaines vitamines, se traduit par des perturbations, souvent très graves, de ces fonctions.

3. Effets de carence des éléments minéraux

Du fait des nombreuses fonctions des éléments minéraux, les carences peuvent se manifester de façons très différentes ; elles peuvent affecter le squelette, le fonctionnement de l'organisme et le niveau des performances.

La plupart des carences minérales conduisent à des baisses de l'appétit, de la résistance aux maladies, de la fécondité, de la production.

Par ailleurs, l'efficacité de l'alimentation minérale dépend fréquemment du respect de certains équilibres, entre minéraux ou entre minéraux et vitamines principalement

4. Utilisation des éléments minéraux

Il ne suffit pas qu'un animal trouve dans son alimentation les minéraux qui lui sont nécessaires. Pour qu'il les assimile correctement, plusieurs conditions sont requises :

4.1 Eléments minéraux doivent être assimilables

L'utilisation digestive du phosphore peut varier de 20% à 80% selon son origine alimentaire. Pour le calcium, l'assimilabilité varie de 20 à 50 %, mais elle est en général plus faible chez les ruminants que chez les monogastriques.

Le phosphore d'origine organique n'est pas forcément plus assimilable que celui qu'apportent les minéraux. Par exemple : une grande partie du phosphore (plus de 60 %) des céréales, issues et tourteaux, est sous forme de phytate, qui ne peut être digéré qu'en présence d'une phytase contenue en faible quantité dans ces aliments, surtout dans le maïs et l'avoine. L'assimilabilité de ce phosphore organique est donc limitée chez les volailles dépourvus de la flore microbienne des ruminants. Elle est au contraire normale chez ces derniers. Quant aux phosphates du lait, ils sont assimilables à 90 %.

4.2 Organisme doit disposer de vitamines et un bon fonctionnement hormonal

- Les vitamines A et D par exemple sont indispensables à la croissance osseuse et à la fixation du calcium par les os. La vitamine C y participe aussi.
- Un bon fonctionnement des glandes thyroïde et parathyroïde est également indispensable.
- La calcitonine (CT), hormone thyroïdienne, diminue la mobilisation du Ca osseux, favorise le dépôt de Ca dans l'os, et protège donc le squelette contre la déminéralisation. Sa sécrétion est stimulée par une calcémie faible.
- La parathormone (PTH) sécrétée par la glande parathyroïde, favorise au contraire la mobilisation du Ca osseux. Sa sécrétion est stimulée par une calcémie élevée.
- Un dérivé de la vitamine D, le dihydrocholécalférol Di(OH)D_3 , synthétisé en 2 étapes par le foie puis par les reins, augmente l'absorption intestinale du calcium et du phosphore, et régularise la fixation de ces minéraux dans l'os. La synthèse du Di(OH)D_3 est accélérée par une baisse de la calcémie et de la phosphatémie, et par la sécrétion de parathormone .

La fixation et la mobilisation de P et Ca sont régulées par un mécanisme hormonal, résumé par la figure :

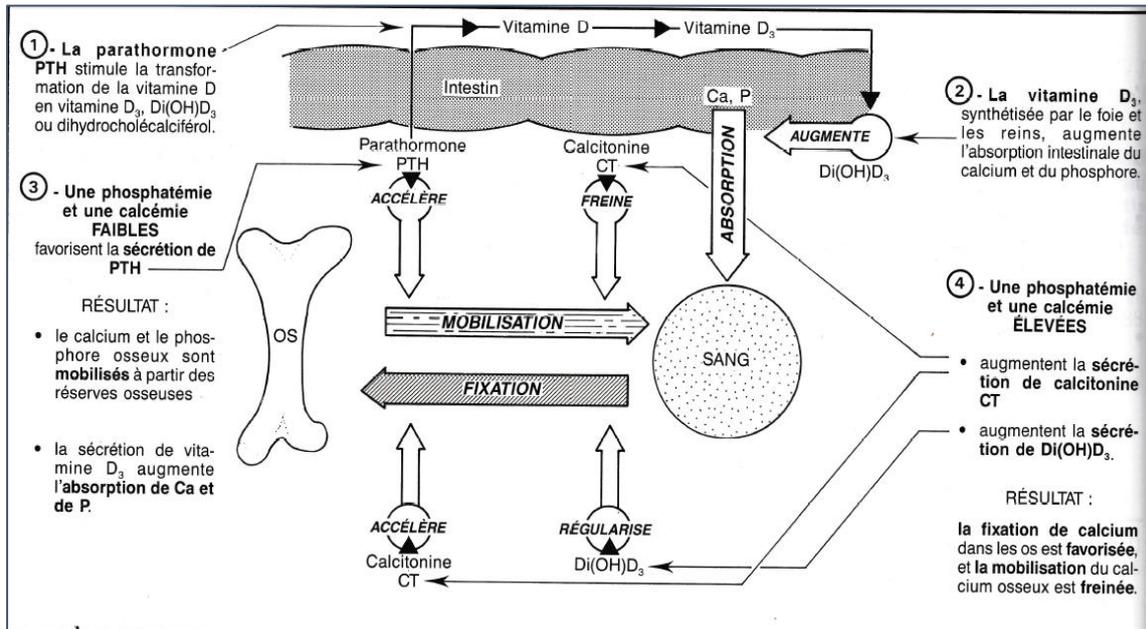


Figure 28: Fixation et Mobilisation de Ca par un mécanisme hormonal

4.3 Animal doit être capable de retenir les minéraux

Le CAR, coefficient d'absorption réelle des minéraux dépend de l'âge : plus l'animal est jeune, mieux il utilise les minéraux.

Chez une forte laitière, les exportations minérales par le lait dépassent toujours les possibilités de rétention de matières minérales alimentaires : même si cette rétention est suffisante, la lactation prélève sur le squelette des minéraux plus directement utilisables. D'où la nécessité de reconstituer ces réserves osseuses durant la période de tarissement.

Des différences existeraient aussi selon les races : les races de type longiligne à aptitude plutôt laitière fixeraient moins bien les minéraux que les races de type plutôt massif qui seraient plus vite saturées.

4.4 Un certain équilibre doit exister entre les différents minéraux.

❖ Equilibre phospho-calcique, ou rapport Ca/P

On cherche généralement à ce que l'alimentation (ration+ complémentation minérale) fournisse Ca et P dans les proportions suivantes :

- Monogastriques : Ca/P = environ 1,2 à 2
- Ruminants : Ca/P = environ 1,5 à 6

❖ Equilibre entre Ca, Mg, K, Na

Il semble souhaitable de rechercher des rapports Ca/Mg et K/Na inférieurs à 4, mais chez les ruminants il est fréquent de rencontrer des rapports K/Na très supérieurs, apparemment sans problèmes. Ce rapport influe entre autres sur l'excitabilité nerveuse et musculaire. Les ions K^+ et Na^+ se comportent en excitants, les ions Ca^{++} et Mg^{++} en dépresseurs. L'organisme maintient constant ce rapport, mais avec plus ou moins de difficulté selon l'équilibre ou le déséquilibre des apports alimentaires. D'où l'intérêt de l'apport simultané de Ca, Mg et Na. L'ion potassium est le plus souvent en excès dans les aliments.

5. Eléments minéraux majeurs

5.1 Calcium et phosphore

Ce sont les minéraux quantitativement les plus importants : ils représentent 75% des minéraux de l'organisme. Le calcium représente 1,3 à 1,8% et le phosphore 0,8 à 1% du poids vif. Le calcium est essentiellement localisé dans le plasma sanguin (9 à 11 mg/ 100 ml).

5.1.1. Rôles du calcium et du phosphore

Le rôle essentiel du calcium et du phosphore se situe dans la formation du squelette et des dents dont ils sont des constituants structuraux fondamentaux. Ils sont aussi des constituants importants, notamment le phosphore, de nombreuses molécules organiques (acides nucléiques, phospholipides, caséine, coenzymes), ce qui leur confère des rôles fonctionnels.

5.1.2. Symptômes des effets de carence.

- ❖ **Croissance** : Toute carence en calcium et phosphore chez le jeune entraîne un ralentissement de la croissance ; un arrêt ou des anomalies dans le développement du squelette (rachitisme, déformations osseuses en particulier articulaires). Chez l'adulte, les troubles osseux consécutifs à une alimentation phosphocalcique insuffisante sont l'os-téomalacie et l'ostéofibrose.
- ❖ **Lactation** : Pendant la lactation, chez les fortes productrices, un prélèvement sur les réserves en calcium et phosphore du squelette est indispensable pour faire face aux exportations importantes du début de la lactation. Ces réserves importantes (7 kg de calcium, 3 kg de phosphore chez un bovin adulte) devront être reconstituées ultérieurement.
- ❖ **Reproduction** : La carence en phosphore a une action nette sur la reproduction : absence de chaleurs, baisse de fertilité, diminution du taux d'éclosabilité des œufs. Une carence en

calcium perturbe le développement et la viabilité des fœtus ; la chute de la production laitière résultant d'une carence en calcium entraîne une plus forte mortalité périnatale.

- ❖ **Ponte** : Le calcium joue un rôle essentiel pour la solidité de la coquille. Si l'apport de calcium est inférieur à 4 g/j, la poule pond des œufs à coquille mince, fragiles et difficiles à commercialiser.

5.2 Magnésium

Il représente environ 0,04 à 0,05 % du poids vif ; il est localisé pour 70 à 75 % dans le squelette. Il intervient dans la formation de l'os, dans l'excitabilité neuromusculaire dont il est un modérateur, et dans de très nombreuses réactions enzymatiques. Les problèmes relèvent des excès qui tendent à diminuer l'utilisation du calcium et du phosphore.

Les symptômes de carence sont principalement nerveux : tétanie d'herbage chez les vaches laitières, tétanie magnésienne chez les veaux et les volailles.

5.3 Sodium et Chlore

Le sodium représente plus de 90 % des cations du plasma sanguin. Un quart du sodium se trouve dans le squelette.

Le chlore est indispensable à la synthèse de l'acide chlorhydrique du suc gastrique. Le sodium joue un rôle important dans l'absorption intestinale.

La teneur des aliments en chlore et en sodium est toujours insuffisante. L'apport est principalement réalisé sous forme de chlorure de sodium (NaCl, communément appelé « Sel »)

Chez la poule pondeuse, un taux excessif de chlore a un effet néfaste sur la qualité de la coquille de l'œuf ; de ce fait, l'apport de chlore doit être limité à 0,14 % du régime.

5.4 Potassium

Le potassium est principalement rencontré dans les muscles (300 à 400 mg/100 g, 75 % du potassium de l'organisme) et le sang (20 mg/100 g). il joue en outre un rôle dans la contraction musculaire.

- La carence en potassium ne se rencontre pas dans la pratique en raison d'apports par les aliments largement suffisants.
- Un excès de potassium et un rapport K/Na trop élevé (supérieur à 10) peuvent être dangereux avec certains aliments consommés par les ruminants (mélasse, feuilles et

collets de betteraves, herbe jeune) ; L'excès de potassium et son excrétion sont associés à une excrétion accrue de sodium, ce qui entraîne une carence en sodium.

5.5 Soufre

Le soufre est un élément minéral qui se situe à la frontière de la nutrition minérale et de la nutrition azotée, l'apport de soufre par les aliments étant normalement assuré par les acides aminés soufrés « cystéine et méthionine », et les vitamines (biotine, thiamine).

Les différents aliments contiennent généralement suffisamment de soufre.

Toutefois, chez les ruminants, le besoin en soufre est particulièrement important avec les rations riches en azote non protéique les microorganismes du rumen ayant alors des besoins particuliers en soufre pour assurer une synthèse protéique maximale.

6. Oligoéléments

Les oligoéléments se distinguent des macroéléments à un double titre :

- Ils sont présents en petites quantités dans les organismes vivants ;
- Ils jouent essentiellement un rôle catalytique ; ils sont en effet principalement utilisés pour la synthèse de systèmes enzymatiques ou d'hormones.

L'excès de certains oligoéléments peut présenter des risques d'intoxication ; c'est le cas en particulier du cuivre chez les ovins, du fluor, du sélénium, du molybdène, de l'arsenic pour tous les animaux,

6.1 Fer

Le fer joue un rôle essentiel comme constituant fonctionnel de diverses molécules indispensables au transport de l'oxygène : hémoglobine (qui représente 50 % du fer de l'organisme), myoglobine, pigments respiratoires,

Symptôme de carence les plus spécifiques : La carence en fer se traduit par des troubles de la synthèse de l'hémoglobine qui provoquent une anémie. Le risque de carence est nul en raison de la richesse en fer de tous les aliments ; seul le lait est pauvre en fer (0,5 à 2 mg/l) et les carences peuvent se manifester chez les jeunes alimentés exclusive-ment ou essentiellement au lait entier.

Chez le veau de boucherie, la carence est recherchée afin d'obtenir une viande blanche, pauvre en myoglobine, correspondant aux habitudes de la majorité des consommateurs.

6.2 Cuivre

Le cuivre intervient dans de nombreuses fonctions : synthèse de l'hémoglobine, production et pigmentation des poils, élaboration du squelette

Principaux symptômes de carence sont les suivants : Chez les bovins, dépigmentation des poils autour des yeux et du nez, troubles osseux (boiteries, fractures spontanées), diarrhées, troubles nerveux et cardiaques, infécondité, diminution de l'appétit et baisse de la production laitière ;

Chez les volailles, diminution du taux d'éclosabilité et de la vigueur des poussins.

L'excès de cuivre peut être toxique, particulièrement chez les ovins où il peut provoquer une crise hémolytique rapidement mortelle.

6.3 Cobalt

Le cobalt est un constituant de la vitamine B12. La carence n'existe que chez les ruminants, chez lesquels le cobalt joue un double rôle :

- Il est utilisé par la flore du rumen pour la synthèse de la vitamine B12 ;
- Il constitue un facteur de croissance et d'équilibre indispensable à la flore du rumen.

Symptôme de carence les plus spécifiques : La carence se manifeste chez les ruminants par de l'inappétence, du pica, de l'anémie, des diarrhées, des poils piqués, de l'amaigrissement,

6.4 Manganèse

Le manganèse joue un rôle dans la formation du squelette, le développement et le fonctionnement de l'appareil reproducteur.

Symptôme de carence les plus spécifiques : Les symptômes de carence sont comparables quelle que soit l'espèce : croissance ralentie et anomalies du squelette chez le jeune, troubles de la reproduction.

Chez les bovins, le symptôme de carence le plus spécifique est un défaut d'aplombs, le « jarret droit », caractérisé par des déformations osseuses.

6.5 Iode

Rôles principaux : Constituant de la thyroxine, hormone de la glande thyroïdienne.

Symptôme de carence les plus spécifiques : Hypertrophie de la glande thyroïdienne (goitre hyperthyroïdien)

La thyroxine, qui intervient dans le métabolisme des glucides, des protéides et des lipides. En l'absence d'iode, la thyroïde est incapable de synthétiser la thyroxine. L'insuffisance de production de la thyroxine ralentit le développement et la maturation des tissus, causée des troubles de la reproduction (irrégularité des cycles et des manifestations des chaleurs, difficultés de fécondation, anomalies du développement fœtal, avortements), un ralentissement de la croissance et une baisse de la production laitière.

6.6 Zinc

Intervient dans de nombreux systèmes enzymatiques au niveau de la respiration cellulaire.

Symptôme de carence les plus spécifiques : Chez les bovins, la carence se manifeste par une baisse d'appétit et de croissance. Elle est, en outre, principalement caractérisée par une pelade (dépilation irrégulière) et une dermite (peau épaisse et irritée).

Chez les volailles, les symptômes de carence sont multiples : ralentissement de la croissance, plumage anormal (plumes cassantes et frisées), peau écailleuse, jarret gonflé et raccourcissement des os longs rendant la démarche difficile, retard de maturité sexuelle des poulettes, fragilité de la coquille et diminution du taux d'éclosion.

6.7 Sélénium

Rôles principaux : Antioxydant.

Symptôme de carence les plus spécifiques : Chez les ruminants, la carence en sélénium provoque chez les jeunes : la myopathie, caractérisée par la dégénérescence des fibres musculaires. La dégénérescence musculaire peut atteindre :

- Le système locomoteur, provoquant des troubles de la démarche (voussure du dos, raideur), des tremblements des muscles perceptibles à la main ;
- Le système musculaire respiratoire, d'où une respiration courte, haletante (dyspnée) ;
- Le cœur, ce qui entraîne alors la mort en cas de lésion importante.

Chez l'adulte, la carence en sélénium agit sur la fertilité des femelles.

Chez les volailles, la carence en sélénium entraîne chez le poulet l'apparition de diathèse exsudative caractérisée par des œdèmes sous-cutanés au niveau de la poitrine, de l'abdomen, de la tête, une coloration brune des muscles, une croissance ralentie et une augmentation de la mortalité.

7. Principes de l'alimentation minérale des animaux

L'alimentation minérale des animaux domestiques a pour but de couvrir les dépenses de l'organisme et d'assurer une minéralisation normale des productions (lait, œuf, fœtus, croît). Elle suppose :

- Une détermination suffisamment précise des besoins alimentaires des différentes catégories d'animaux, desquels on déduit des apports alimentaires recommandés ;
- Une évaluation des apports de la ration, ce qui implique une bonne connaissance de la composition des différents aliments constituant la ration ;
- Une complémentation minérale éventuelle de la ration à partir de matières premières minérales. Les problèmes concernent alors d'une part le choix de ces matières premières aux plans quantitatif et qualitatif, d'autre part les modalités de leur distribution.

8. Apport de minéraux par les aliments

– Fourrages

Les teneurs des fourrages verts et conservés varient principalement selon la famille botanique. Les légumineuses et les crucifères sont 4 ou 5 fois plus riches en calcium que les graminées (plus de 10 g de Ca/kg MS) ; elles sont en outre un peu plus riches en magnésium, sodium et cuivre, et un peu plus pauvres en phosphore, zinc et manganèse.

L'ensilage de maïs est particulièrement pauvre en calcium et phosphore (1,8 et 2 g/ kg MS).

– Aliments concentrés

Ces aliments sont riches en phosphore (3 à 6 g/ kg MS), principalement les tourteaux et les graines de légumineuses, mais leur teneur est insuffisante en sodium (moins de 0,5 g/ kg MS), de même qu'en calcium, surtout pour les céréales (moins de 1 g/kg MS) et à l'exception des tourteaux de colza (plus de 8 g/kg MS). Leurs teneurs en potassium, magnésium et oligoéléments, notamment fer et cuivre, sont satisfaisantes.

Une caractéristique importante des aliments concentrés est la présence du phosphore, dans les graines, sous forme de sels d'acide phytique : les phytates de potassium, calcium et magnésium. Ce phosphore phytique représente 50 à 75% du phosphore des graines des végétaux, céréales ou autres, le son de blé contient 90 % de son phosphore sous forme phytique.

L'utilisation du phosphore phytique pose un problème dans la mesure où les phytates doubles de calcium et magnésium (phytine) et le phytate de calcium sont insolubles et, de ce fait, mal utilisés. Elles sont abondantes dans le rumen, mais absentes chez les volailles. De ce fait, on considère généralement que le phosphore phytique est normalement utilisé par les ruminants, alors qu'il ne l'est du tout par les oiseaux

– Quelques autres aliments

Les pulpes de betteraves sont très pauvres en phosphore (1 g/ kg MS), mais riches en calcium (14 g/kg MS, mais ce dernier a une digestibilité faible de 20 %).

Les aliments d'origine animale (lait et coproduits) sont très riches en éléments minéraux, notamment en calcium et en phosphore.

II. Alimentation vitaminique

1. Définition

Les vitamines (du latin vita signifiant « vie » et du radical chimique « amine ») sont des substances organiques que l'on peut définir sur le plan nutritionnel par les caractéristiques suivantes :

- Sont des substances organiques appartenant à diverses familles chimiques (glucides, lipides, protides),
- Elles sont indispensables au bon fonctionnement de l'organisme animal ;
- Elles sont actives à faible dose, de l'ordre du milligramme ou microgramme par kg d'aliment ;
- Elles ont une action spécifique, aucune vitamine n'étant plus importante qu'une autre ;
- Leur carence provoque des avitaminoses
- Elles sont fragiles : la chaleur, l'oxydation, la lumière, peuvent les inactiver rapidement.

L'absence de vitamine « avitaminose », ou une carence « hypovitaminose » provoqué par des apports insuffisants entraîne divers troubles de la santé. On observe également qu'un apport excessif de vitamines peut provoquer une hypervitaminose, très toxique pour l'organisme.

2. Rôles des vitamines

Les vitamines permettent, par leur action de type catalytique, le déroulement de nombreuses activités enzymatiques indispensables à la vie, et elles se montrent tout aussi essentielles que

les nutriments quantitativement plus importants. Comme les oligoéléments, avec lesquels elles agissent souvent en synergie, elles doivent être apportées en quantité suffisante pour permettre l'obtention de performances zootechniques optimales, pour maintenir l'état de santé des animaux et pour améliorer la qualité des produits d'origine animale destinés à l'homme.

3. Synthèse des vitamines

L'animal étant incapable de synthétiser la plupart des vitamines, elles doivent donc être présentes dans la ration sous forme de compléments, l'organisme est néanmoins capable de réaliser la synthèse de :

- ✚ La vitamine K (par la flore intestinale des mammifères),
- ✚ La vitamine C par les glandes surrénales chez tous les animaux domestiques,
- ✚ Les vitamines du groupe B par les microorganismes du rumen et du caecum.
- ✚ La vitamine D par la peau chez les mammifères grâce au rayonnement solaire

4. Classification des vitamines

On distingue habituellement deux groupes de vitamines :

- Vitamines liposolubles, solubles dans les graisses. La plupart d'entre-elles entrent dans la constitution d'hormones : on dit que ce sont des hormovitamines, leur stockage dans l'organisme est possible ce sont les vitamines des groupes A, D, E, F et la vitamine K ;
- Vitamines hydrosolubles, solubles dans l'eau. Elles jouent exclusivement le rôle de catalyseurs dans les réactions du métabolisme. On dit parfois que ce sont des enzymovitamines. Elles ne peuvent se mettre en réserve dans l'organisme : la vitamine C et les vitamines du groupe B.

4.1. Vitamines liposolubles

4.1.1. Vitamine A, ou rétinol

Elle est absente chez les végétaux et abondante dans les huiles de foie de poisson. La vitamine A est stockée dans le foie qui peut ainsi constituer une importante réserve pour l'organisme (de 40 à 200 µg de rétinol par gramme de foie) .

La vitamine A joué deux rôles différents dans l'organisme :

- Elle est indispensable à la synthèse du pourpre rétinien qui intervient dans la vision ;
- Elle est nécessaire à la croissance et à la protection des tissus épithéliaux et des muqueuses.

Les symptômes de carence en vitamine A sont très variés :

- ❖ Une baisse de la vision.
- ❖ Chez les jeunes : un retard de croissance, une perte d'appétit, une sensibilité accrue aux infections et infestations parasitaires entraînant une mortalité plus élevée.
- ❖ Au niveau de l'appareil reproducteur, il y a atrophie des testicules chez le mâle. Chez la femelle, des irrégularités du cycle œstral, des malformations fœtales, des avortements et des rétentions placentaires.

4.1.2. Vitamines du groupe D Antirachitique

On distingue deux formes principales de vitamines D :

- Vitamine D2 (ou ergocalciférol) ; elle est synthétisée dans les fourrages au cours du fanage
- Vitamine D3 (ou cholécalciférol), très abondante dans l'huile de foie des poissons marins ; elle peut être synthétisée chez les mammifères au niveau de la peau, sous l'action des rayons ultraviolets ; passe dans le sang ou est absorbée au cours du léchage.

Rôles, Symptômes de carence et d'excès :

- ❖ Les vitamines D favorisent l'absorption intestinale du calcium et la fixation par l'os du calcium et phosphore. Des symptômes de carence en découlent : ce sont le rachitisme chez le jeune et la fragilisation des os chez les adultes.
- ❖ Chez les vaches laitières en début de lactation, la carence en vitamine D peut être une des causes de la fièvre vitulaire ; des apports renforcés de vitamine D sont recommandés avant le vêlage.
- ❖ Les poules pondent des œufs à coquille mince et la ponte diminue.

4.1.3. Vitamines du groupe E

La vitamine E est un antioxydant biologique protégeant de l'oxydation des acides gras insaturés (constituants majeurs des membranes cellulaires de l'organisme), d'autres vitamines (notamment la vitamine A), des hormones et enzymes. Elle exerce, en outre, un effet positif sur les défenses immunitaires.

Les symptômes de carence, variables selon les espèces, sont la conséquence d'altérations au niveau des tissus musculaires, conjonctifs, nerveux, hépatiques. La dégénérescence musculaire (myopathie) est le symptôme le plus fréquemment rencontré chez les jeunes ruminants.

4.1.4. Vitamines K

La vitamine K, ou antihémorragique, ou vitamine de coagulation, se présente principalement sous deux formes :

- Vitamine K1, présente dans les végétaux verts ;
- Vitamine K2, synthétisée par la flore bactérienne du tube digestif des mammifères.

Rôles et Symptômes de carence :

La vitamine K est indispensable à la synthèse, au niveau du foie, de la thrombine qui provoque la coagulation du sang.

La carence en vitamine K entraîne une diminution importante du taux sanguin de thrombine et un allongement du temps de coagulation ; tout traumatisme entraîne alors des hémorragies internes et une mortalité élevée.

4.1.5. Vitamines F

Les vitamines F sont des acides gras polyinsaturés. Les recommandations d'apports peuvent être de plusieurs grammes/jour pour les animaux d'élevage.

Les principaux acides gras essentiels polyinsaturés sont :

- ✚ Acide linoléique, C18:2 (un oméga 6) ;
- ✚ Acide α -linoléique, C18; 3 (un oméga 3) ;
- ✚ Acide arachidonique, C20:4 précurseur des prostaglandines;
- ✚ Acide docosapentaénoïque C22:5 et l'acide C 22:6 docosahexaénoïque,

4.2. Vitamines hydrosolubles

Les vitamines de ce groupe, du fait de leur caractère hydrosoluble, ne s'accumulent pas dans l'organisme ; en conséquence, un apport quotidien suffisant est indispensable.

4.2.1. Vitamine C, ou acide ascorbique

Est synthétisée par tous les animaux domestiques dans les capsules surrénales à partir du glucose et, sans doute, par les bactéries du rumen pour les ruminants : les animaux domestiques ne sont pas tributaires d'un apport alimentaire de vitamine C.

4.2.2. Vitamines de groupe B

Les vitamines du groupe B sont des cofacteurs enzymatiques et jouent de ce fait un rôle essentiel dans le fonctionnement cellulaire.

1. **Vitamine B1, ou thiamine**, joue un rôle fondamental dans le métabolisme des glucides et, en cas de carence, les troubles affectent principalement le système nerveux.
2. **Vitamine b2, ou riboflavine**, intervient dans les transferts d'hydrogène et dans l'utilisation de l'oxygène par les tissus. Les symptômes de carence sont peu spécifiques ; la baisse de l'appétit et le ralentissement de la croissance: chez les jeunes poulets, des boiteries et une déformation des doigts, recroquevillés vers l'intérieur.
3. **Niacine, ou acide nicotinique**, intervient comme la vitamine b2. Le tryptophane est un acide aminé qui peut jouer le rôle de provitamine. En cas de carence, le ralentissement de croissance et la perte d'appétit s'accompagnent de lésions de la peau et des muqueuses, et de boiteries chez les volailles
4. **Acide pantothénique, ou vitamine b3**, joue un rôle essentiel dans les conversions entre nutriments, acides gras, glucides et acides aminés. Les symptômes de carence sont peu spécifiques : perte d'appétit et ralentissement de la croissance, altérations de la peau.
5. **Vitamine b6, ou pyridoxine**, intervient dans le métabolisme des acides aminés. Elle intervient donc dans tous les processus vitaux et les symptômes de carence sont très peu spécifiques : croissance ralentie, troubles cutanés (dermite), troubles nerveux.
6. **Biotine, ou vitamine b8**, est une coenzyme intervenant dans le transport des radicaux CO₂ ayant un effet dans le métabolisme des glucides, des lipides et des protéines. Les effets de carence sont une diminution de l'appétit et de la vitesse de croissance.
7. **Acide folique, ou vitamine b9**, intervient en relation avec la vitamine b12 dans la synthèse des acides nucléiques ; elle intervient aussi dans l'hématopoïèse. Les symptômes de carence

sont une baisse de l'appétit, un ralentissement de la croissance, de l'anémie, chez les oiseaux une dépigmentation des plumes.

8. **Vitamine b12**, ou **cyanocobalamine**, joue un rôle dans la synthèse des acides nucléiques ; elle intervient donc dans la multiplication cellulaire, d'où son rôle, en particulier, au niveau de la croissance et de la fabrication des globules rouges (vitamine antianémique). Les principaux symptômes de carence sont un ralentissement de la croissance et un accroissement de la mortalité chez les jeunes ; chez les volailles, cette carence entraîne également une diminution de la ponte et du taux d'éclosion.
9. **Choline** se distingue des autres vitamines du groupe B : elle n'agit pas comme cofacteur enzymatique, elle est un constituant abondant des phospholipides et le besoin est élevé. Elle est en outre synthétisée dans l'organisme à partir d'un acide aminé, la sérine.

Des symptômes spécifiques de carence sont rencontrés : pérosis chez les oiseaux (lésions osseuses et articulaires des pattes), nécrose rénale chez le lapin.

4.2.2.1. Animaux victimes de carences

Les synthèses microbiennes du rumen chez les ruminants et du caecum chez le cheval assurent une part très importante de la couverture des besoins en vitamines du groupe B, au contraire des monogastriques qui, en raison de la localisation de la flore microbienne à la fin de l'intestin sont totalement dépendants des apports alimentaires. Seul le lapin, grâce au phénomène de caecotrophie, peut bénéficier de ces synthèses microbiennes et couvrir ainsi partiellement ses besoins.

4.2.2.2. Apports alimentaires et la couverture des besoins

❖ Chez les polygastriques

En raison des synthèses abondantes de vitamines du groupe B dans le rumen et le cæcum, les risques de carence peuvent être considérés comme improbables, sauf chez les animaux à niveau de production élevé, les jeunes en croissance rapide, et les femelles en début de lactation.

L'apport en vitamines protégées du groupe B a un impact positif sur les performances de production des vaches laitières : les hautes productrices, les primipares ayant un niveau de production plus faible, les animaux âgés, et les vaches en début de lactation. Cependant, certains risques de carence existent :

- Une carence indirecte en vitamine B12 peut être la conséquence d'un apport insuffisant en cobalt, nécessaire à la synthèse de cette vitamine par les micro-organismes.
- Les risques de carence en vitamine B1 sont accrus dans certaines circonstances : rations très concentrées à base d'ensilage de maïs, de racines, de mélasse ou de céréales ; utilisation de pulpes surpressées traitées avec un excès de sulfates, qui détruisent la vitamine B1. Une supplémentation en thiamine devient alors indispensable.
- Chez les vaches laitières à haut niveau de production, une supplémentation en niacine en début de lactation permet de stimuler la microflore du rumen, avec pour conséquence une augmentation de la consommation, de la production, et une amélioration de l'efficacité alimentaire.

De manière générale, l'augmentation des niveaux de production et la simplification croissante des régimes pourraient rendre plus difficile la satisfaction des besoins à partir des seules synthèses microbiennes.

❖ Chez les monogastriques

Bien que les vitamines du groupe B soient généralement présentes en quantité satisfaisante dans de nombreuses matières premières, les apports de certaines d'entre elles restent indispensables, notamment chez les espèces principalement élevées en hors-sol.

- La vitamine B12, abondante dans les produits laitiers et la luzerne, doit être ajoutée aux rations à base de céréales-tourteaux, qui en sont insuffisamment pourvues.
- La niacine est relativement répandue, mais un apport supplémentaire est recommandé, en particulier dans les formules maïs-soja, souvent pauvres en niacine et contenant des antivitamines.
- L'acide pantothénique est très répandu dans les matières premières, mais une supplémentation est pratiquée chez les jeunes animaux à titre de précaution.
- La variabilité des résultats de dosage de la vitamine B6 rend une supplémentation nécessaire, notamment en début de croissance.
- La biotine est présente dans presque toutes les matières premières, mais sa faible disponibilité dans les céréales, ainsi que la présence éventuelle d'antivitamines, justifient une supplémentation, notamment chez le dindonneau, dont les besoins en biotine sont importants.
- L'acide folique est assez répandu dans la plupart des aliments, sauf dans le manioc.

- Chez les volailles, qui dépendent totalement des apports alimentaires, une supplémentation est nécessaire, en particulier en raison de l'activité antivitaminique de certains coccidiostatiques.
- La synthèse de vitamine B12 par la flore intestinale du lapin est très active, ce qui permet de couvrir ses besoins. Toutefois, lorsque le régime est entièrement végétal, une supplémentation est nécessaire.
- Bien que les animaux soient capables de synthétiser la choline, une supplémentation est indispensable pour couvrir les besoins en élevage intensif.

Chapitre 06 : Mesures de l'utilisation digestive des différentes espèces animales (Mesure de la digestibilité-Facteurs de variation)

Les aliments ingérés ne sont pas absorbés en totalité, une partie des ingesta (I) traverse le tube digestif et se retrouve dans les fèces (F). L'utilisation digestive des aliments est caractérisée par leur digestibilité.

1. Digestibilité

1.1. Digestibilité apparente

La digestibilité apparente (d_a) est la proportion d'aliments qui disparaît apparemment dans le tube digestif :

$$d_a = \frac{I - F}{I} = \frac{\text{quantité ingérée} - \text{quantité excrétée dans les fèces}}{\text{quantité ingérée}}$$

La digestibilité est toujours inférieure à 1. Elle peut s'appliquer à différents composants de la ration ou de l'aliment : matière sèche, matière organique (dMO), acides gras (dAG), divers constituants organiques, azote (dN), énergie (dE).

Tableau 11: Digestibilité de quelques aliments pour ruminants

	dE	dMO	dN	dAG
Maïs	0,86	0,89	0,66	0,74
Tourteau de soja 48	0,92	0,92	0,80	0,66

Lorsqu'on emploie le terme général de digestibilité d'un aliment, on désigne la digestibilité apparente de la matière organique de cet aliment (dMO).

Coefficient d'utilisation digestive (CUD), ou coefficient de digestibilité, est le produit de la digestibilité par 100, exprimé en pourcentage : $CUD_a (\%) = d_a \times 100$.

1.2. Digestibilité réelle

Les fèces excrétées ont en fait deux origines : les ingesta, ou aliments ingérés et les substances endogènes (sécrétions digestives, mucus, produits de desquamation de la paroi du tube digestif) ou d'origine microbienne, on les appelle fèces endogènes (F_e)

La digestibilité réelle (dr), proportion d'aliments qui disparaît réellement dans le tube digestif, est donc plus élevée que la digestibilité apparente (da) :

$$dr = \frac{I - (F - Fe)}{I} = \frac{\text{quantité ingérée} - (\text{quantité excrétée dans les fèces} - \text{quantité endogène})}{\text{quantité ingérée}}$$

2. Digestibilité des différents constituants cellulaires

Pour les aliments d'origine végétale en particulier, il faut distinguer, au plan de l'utilisation digestive, les constituants intracellulaires (glucides cytoplasmiques, lipides, protides) et les constituants pariétaux (glucides pariétaux notamment).

2.1. Digestibilité des constituants intracellulaires

Il s'agit des glucides cytoplasmiques hydrosolubles (sucres) et de réserve (amidon), des lipides et des protides intracellulaires. Leur digestibilité est élevée chez toutes les espèces.

Pour les aliments concentrés, la digestibilité des constituants intracellulaires est de 70 à 100%. Elle est proche de 100% chez tous les animaux pour les sucres et l'amidon.

Pour les fourrages consommés par les herbivores, ruminants et chevaux, la digestibilité de tous les constituants du contenu cellulaire est élevée. Totale pour les glucides hydrosolubles et le plus souvent pour l'amidon, elle peut atteindre 95 % pour les matières azotées et les lipides des fourrages.

Différents facteurs peuvent influencer la digestibilité des constituants intracellulaires :

La nature des aliments végétaux : Par exemple, la digestibilité iléale de l'amidon chez le cheval varie de 70 à 95 % en fonction des sources alimentaires : l'amidon du blé, de l'orge et de l'avoine sont plus digestibles que celui du maïs et surtout des pommes de terre crues.

La nature des constituants : La digestibilité réelle dans l'intestin grêle des protéines microbiennes est assez constante et voisine de 80 %, les protéines alimentaires non dégradées dans le rumen ont une digestibilité qui varie de 50 à 95 % selon les aliments.

Les constituants cellulaires : Les aliments peuvent contenir des substances qui entravent le bon déroulement de la digestion. Ce sont des facteurs antinutritionnels tels que les tannins qui complexent les protéines, le facteur antitrypsique du soja.

L'âge des animaux : Après la naissance, l'activité enzymatique des monogastriques se met progressivement en place, permettant une dégradation plus ou moins importante des constituants.

2.2. Digestibilité des constituants pariétaux

Ce sont les constituants des parois végétales composés des glucides pariétaux (cellulose, hémicelluloses, pectines), plus ou moins incrustés de lignine.

La digestibilité des constituants non lignifiés dépend largement de l'espèce utilisatrice pour toutes les catégories d'aliments végétaux. Pratiquement indigestibles chez les volailles, ces parois ont une digestibilité de 10 à 30% chez le lapin, 80 à 90 % chez les ruminants. Plus faible de 70 à 80% chez les chevaux.

Les différences sont liées essentiellement à la présence de microbes, surtout les bactéries cellulolytiques du rumen et du gros intestin, ainsi qu'à la durée du séjour des particules alimentaires dans ces réservoirs.

La lignine est très peu digestible par toutes les espèces. En outre, elle rend la cellulose, et plus encore les hémicelluloses, inaccessibles ou résistantes aux bactéries cellulolytiques. La lignine constitue donc une barrière à la digestion des parois dans toutes les espèces, y compris chez les herbivores.

La digestibilité des constituants pariétaux, liée à la teneur en lignine, détermine la digestibilité des aliments.

3. Conséquences sur la digestibilité de la matière organique

Principe général : La digestibilité des différents constituants cellulaires conduit à une loi générale dans toutes les espèces : la digestibilité de la matière organique des aliments diminue quand la teneur en parois augmente.

Plus précisément, la digestibilité de la matière organique dépend de teneurs des parois. Et de l'espèce utilisatrice qui digère plus ou moins complètement les parois non lignifiées.

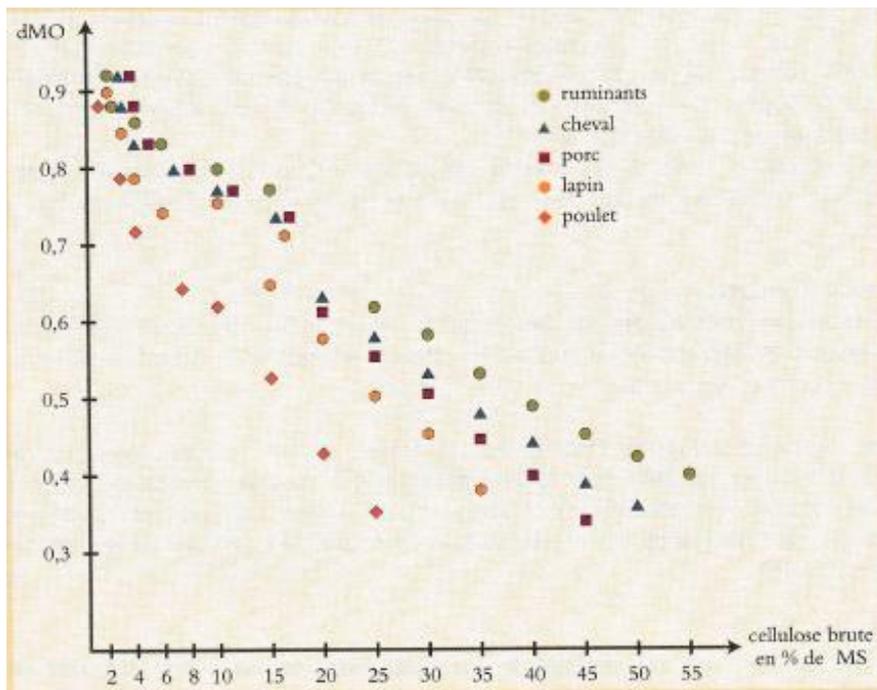


Figure 29: Digestibilité de la matière organique (dMO) chez différents types d'animaux en fonction de la teneur en cellulose brute (CB) de l'aliment

3.1. Chez les herbivores

C'est grâce à la présence d'une population microbienne dense dans les préestomacs des ruminants et dans le gros intestin des équidés que les parois non lignifiées, et donc la matière organique des fourrages, peuvent être utilisées efficacement. C'est la proportion de parois lignifiées qui limite la digestibilité des parois et donc celle de la matière organique.

La teneur en parois, et surtout en parois lignifiées, est plus élevée dans les fourrages que dans les aliments concentrés, c'est pourquoi la digestibilité des concentrés est supérieure à celle des fourrages

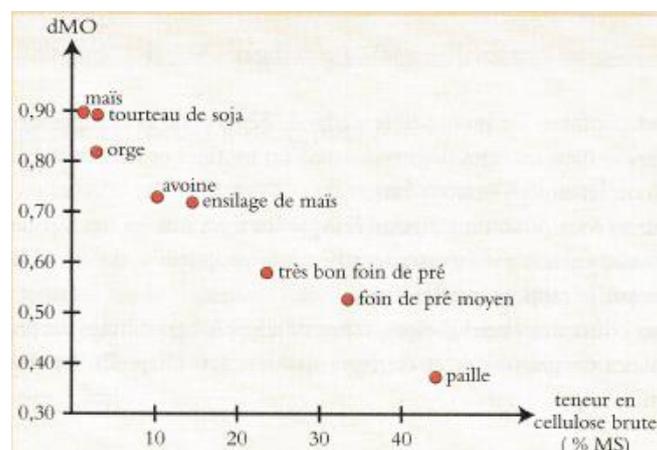


Figure 30: Digestibilité de la matière organique des principaux aliments des chevaux selon la teneur en cellulose brute

3.1.1. Fourrages

La digestibilité des fourrages est très variable : de 0,40 pour la paille à 0,80 pour une jeune herbe. Elle dépend essentiellement de l'espèce animale considérée et du stade de végétation auquel ils sont consommés.

Tableau 12: Digestibilité de la matière organique de quelques fourrages chez les ruminants et les chevaux.

	dMO chez les ruminants	dMO chez les chevaux
Jeune herbe feuillue (prairie permanente)	0,80	0,75
Ensilage d'herbe	0,65 – 0,75	0,60 – 0,70
Ensilage de maïs	0,71	0,72
Foin	0,50 – 0,65	0,45 – 0,60
Paille	0,45	0,40

3.1.1.1. Différences observées entre espèces animales

Une absence de rumination et la plus faible durée de séjour des parois végétales dans le gros intestin du cheval (24 à 48 heures) par rapport à celle observée dans le rumen (48 à 72 heures) expliquent en grande partie que la digestion de ces parois, donc des fourrages, est moins poussée chez les chevaux que chez les ruminants.

3.1.1.2. Influence du stade de végétation

La teneur en parois indigestibles, ou indigestible pariétal, dépend de la composition morphologique des plantes : elle est plus élevée dans les tiges (légumineuses) ou les tiges et les gaines (graminées) que dans les feuilles (légumineuses) ou les limbes (graminées).

Les feuilles (ou les limbes) sont donc plus digestibles que les tiges (ou les tiges et les gaines), de sorte que la digestibilité de la plante entière est étroitement liée à la proportion de ces différents organes dans la plante, que l'on estime par le rapport feuilles/tiges.

La digestibilité de la matière organique diminue au fur et à mesure que la plante vieillit.

3.1.2. Racines et Tubercules

Les racines et les tubercules frais sont des aliments riches en eau, organes de réserve, ces aliments sont pauvres en parois, elles-mêmes peu ou pas lignifiées, mais riches en sucres (betteraves, carottes) ou en amidon (pommes de terre). Ils sont donc très digestibles (> 85 %) et riches en énergie.

3.1.3. Concentrés

La digestibilité des aliments concentrés varie d'environ 70 à 90 % chez les ruminants comme chez les chevaux, où elle est légèrement inférieure.

Tableau 13: Digestibilité des aliments concentrés chez les ruminants et les chevaux

	dMO chez les ruminants	dMO chez les chevaux
Céréales	0,65 – 0,95	0,71 – 0,90
Coproduits des céréales	0,70 – 0,90	0,66 – 0,83
Graines de légumineuses	0,65 – 0,95	0,84 – 0,88
Tourteaux	0,70 – 0,95	0,80 – 0,87

La digestibilité des aliments concentrés d'origine végétale dépend de leur teneur en parois. Ces aliments, généralement pauvres en parois peu digestibles, ont une digestibilité élevée dans la majorité des cas.

4. Mesure de la digestibilité apparente

- a) **Sur un animal vivant (mesure "in vivo").** Maintenu en cage, l'animal est nourri de l'aliment à tester, et l'on mesure les quantités ingérées et les fèces excrétées. L'analyse de l'aliment et des excréments permet de déterminer la digestibilité non seulement de la matière organique mais également de chaque constituant.



Figure 31: Cage de digestibilité

- b) **Dans des éprouvettes (mesure "in vitro").** Des méthodes simplifiées sont expérimentées comme celle qui consiste à mesurer la digestibilité des fourrages verts par fermentation d'un échantillon dans un tube de verre en présence de jus de rumen. Pour d'autres aliments, on utilise l'addition de diastases digestives.

- c) **Dans des sacs immergés dans le rumen (mesure "in sacco").** Des vaches fistulisées permettent l'immersion directe dans la panse de sacs de nylon tressé contenant l'échantillon à analyser. Soumis aux fermentations du rumen, l'aliment en question est analysé avant et après le test. On parle aussi de mesure de la "dégradabilité in sacco".



Figure 32: Méthode in sacco, vache fistulée

5. Mesure de la digestibilité réelle

Pour mesurer la digestibilité réelle dr , il faut pouvoir évaluer la fraction endogène F_e des fèces. On y parvient par l'emploi d'isotopes radioactifs permettant de "marquer" les aliments. Il s'agit de méthodes complexes qui ne sont pas utilisées dans les mesures de routine.

Chapitre 07 : Aliments de Bétail

1. Deux méthodes de rationnement / Trois types d'aliments

Il existe aujourd'hui deux grandes méthodes de rationnement, faisant appel à 3 familles d'aliments :

- ✚ Les aliments COMPLETS, achetés ou fabriqués par l'éleveur,
- ✚ Les aliments FERMIERS, produits sur l'exploitation,
- ✚ Les aliments COMPLÉMENTAIRES des aliments fermiers, achetés ou fabriqués par l'éleveur pour compléter les aliments produits sur la ferme

1.1. Les aliments sont "simples" ou "composés"

Aliments simples : Sont des produits d'origine végétale ou animale à l'état naturel, frais ou conservés, et les dérivés de leur transformation industrielle, comprenant ou non des additifs, destinés tels quels à l'alimentation animale par voie orale. Exemple : tourteau de soja, blé, maïs...

Aliments composés : Sont "des mélanges de produits d'origine végétale ou animale à l'état naturel, frais ou conservés, ou de dérivés de leur transformation industrielle, comprenant ou non des additifs, qui sont destinés à l'alimentation animale par voie orale, sous forme d'aliments complets ou complémentaires. Ils peuvent se présenter aussi sous forme liquide ;

1.1.1. Aliments simples, produits ou non sur la ferme

Les aliments simples, qu'ils soient produits sur l'exploitation ou achetés, peuvent être classés d'après leur concentration nutritive :

1.1.1.1 Aliments grossiers ont une faible concentration énergétique et azotée

L'énergie et les matières azotées qu'ils contiennent sont diluées dans un important volume constitué par :

- a) De la cellulose dans les aliments grossiers "encombrants", dont la matière sèche contient plus de 75% de cellulose. Parmi eux on distingue :
 - Les aliments à haute teneur en matière sèche : Les foins et les fourrages déshydratés ;
 - Les aliments à teneur variable en matière sèche : l'herbe des prairies et les ensilages.
- b) De l'eau dans les aliments grossiers "succulents", Dont la matière sèche contient moins de 15% de cellulose, comme dans les aliments concentrés, mais dont la teneur en matière

sèche est faible. C'est pourquoi on les appelle parfois "aliments concentrés dilués". Ce sont les racines, les tubercules, les choux fourragers ...

1.1.1.2. Aliments concentrés ont une forte concentration énergétique ou azotée

L'énergie et les matières azotées qu'ils contiennent ne sont diluées ni par de la cellulose ni par de l'eau. Ils ont donc une forte teneur en matière sèche, et celle-ci contient toujours moins de 15% de cellulose. Ce sont (pour les principaux) :

- Les céréales et les issues de meunerie,
- Les tourteaux et graines oléo-protéagineuses,
- Les aliments d'origine animale, le lait et ses dérivés, les farines animales,
- Les levures.

1.1.2. Caractéristiques, valeur et emploi des principaux aliments simples

Tableau 14: Caractéristiques, valeur et emploi des principaux aliments simples

Classification des aliments de chaque groupe	Leur valeur	Leur emploi
<p>LES FOINS</p> <ul style="list-style-type: none"> - De prairies naturelles (à flore variée) - De prairies temporaires <ul style="list-style-type: none"> ▪ De graminées seules ▪ De graminées + légumineuses ▪ De légumineuses seules (ou prairies artificielles) 	<p><u>Leur valeur dépend :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • surtout de leur stade de récolte, dont l'optimum est : -graminées, début épiaison -légumineuses, bourgeonnement •de leur pourcentage de légumineuses, • des conditions de récolte et de conservation. <p><u>Des chiffres / kg de MS</u></p> <p>MS : varie peu 85 à 90 %.</p> <p>UF : varie beaucoup selon la flore, le stade et les conditions de récolte : 0,55 à 0,80 UFL, 0,45 à 0,75 UFV.</p> <p>PDI : varie énormément selon la flore et le stade de récolte : 45 à 125 g de PDIN, 65 à 100 g de PDIE.</p> <p>Vitamines : varie beaucoup : les foins sont riches en vitamine A lorsque leur couleur est encore verte</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aliment quasi-indispensable à tous les herbivores, ruminants ou non. • Aliment de lest agissant par : Son volume : permet le brassage efficace et la rumination ; Sa rugosité : favorise la salivation et diminue les risques de météorisation. • Aliment appétible lorsqu'il est de bonne qualité. • Permet une économie de concentrés azotés quand il est riche en PDI (foin de luzerne, trèfle, lotier. ...).
<p>LES FOURRAGES GROSSIERS DÉSHYDRATÉS</p> <p>Nature du fourrage :</p>	<p><u>Leur valeur dépend :</u></p>	<p>L'ingestibilité des fourrages déshydratés est plus élevée, ce</p>

<ul style="list-style-type: none"> • Luzerne • Graminées <p>Conditionnement :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Condensé : broyage + presse à filière. • Compacté : presse à filière uniquement. • Comprimé : presse à piston ; donne des brins longs. 	<ul style="list-style-type: none"> • comme pour les foins, surtout de leur stade de récolte, • de la longueur des brins : plus les brins sont fins, plus la digestibilité diminue quand la consommation augmente. Au-dessous de 1,25 mm, il n'y a plus de rumination, et apparaissent des lésions du rumen. 	<p>qui compense une digestibilité un peu plus faible.</p> <p>Ils modifient les fermentations du rumen : moins d'acide acétique, plus d'acide propionique. Ils conviendraient donc mieux à la production de viande qu'à celle du lait.</p>															
<p>LES PAILLES</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ De céréales ▪ De graminées fourra-gères (à graines). 	<p><u>Leur valeur dépend</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ De l'espèce : la meilleure est l'avoine, puis orge et blé, ▪ Des conditions bonnes ou mauvaises de récolte. <p><u>Des chiffres / kg de MS</u></p> <p>Pauvres en UF : 0,40 à 0,70 UFL, 0,30 à 0,60 UFV</p> <p>Pauvres en PDI : 20 à 40 g de PDIN 40 à 60 g de PDIE</p> <p>Pauvres en Ca, P et vitamines.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Leur complémentation est indispensable en énergie, azote, minéraux, vitamines. - Leur traitement par l'ammoniac est possible pour améliorer leur valeur en énergie (de 0,10 à 0,15 UFL et en PDI (10 g) et en MM et la digestibilité. 															
<p>LES ENSILAGES D'HERBE ET D'AUTRES FOURRAGES VERTS</p> <p>Type de fourrage :</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Herbe de prairies : graminées et légumineuses en mélange ou pures. ❖ Fourrages annuels : cultures pures ou mélanges de seigle, avoine, orge, blé, vesce, féverole, pois, trèfle d'Alexandrie. 	<p><u>Leur valeur dépend :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • surtout de leur stade de récolte. Optimum : graminées, début épiaison, légumineuses ; bourgeonnement. • de leur pourcentage de légumineuses. • de la bonne réalisation des travaux d'ensilage <p><u>Des chiffres / kg de MS</u></p> <p>MS : 18 à 50 %</p> <table border="1" data-bbox="582 1563 1008 1787"> <thead> <tr> <th></th> <th>Graminées</th> <th>Légumineuses</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>UFL</td> <td>0,75 à 1,00</td> <td>0,65 à 0,95</td> </tr> <tr> <td>UFV</td> <td>0,65 à 0,95</td> <td>0,65 à 0,85</td> </tr> <tr> <td>PDIN</td> <td>60 à 120</td> <td>100 à 115</td> </tr> <tr> <td>PDIE</td> <td>55 à 85</td> <td>70 à 80</td> </tr> </tbody> </table> <p>Vitamines: beaucoup plus riche en vitamines A que le foin.</p>		Graminées	Légumineuses	UFL	0,75 à 1,00	0,65 à 0,95	UFV	0,65 à 0,95	0,65 à 0,85	PDIN	60 à 120	100 à 115	PDIE	55 à 85	70 à 80	<p>Les ensilages de fourrages verts complètent ou remplacent les fourrages classiques d'hiver. Leur intérêt tient à quelques caractéristiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Facilité de récolte, quel que soit le temps • Très appétibles quand ils sont réussis. • Favorisent le taux butyreux.
	Graminées	Légumineuses															
UFL	0,75 à 1,00	0,65 à 0,95															
UFV	0,65 à 0,95	0,65 à 0,85															
PDIN	60 à 120	100 à 115															
PDIE	55 à 85	70 à 80															
<p>LES ENSILAGES DE MAÏS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plante entière verte • Plante entière mûre. 	<p>Se caractérisent par leur déséquilibre prononcé :</p> <ul style="list-style-type: none"> • grande richesse en UF 	<p>Sont fréquemment employés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • plante entière pour tous bovins, ovins, 															

<ul style="list-style-type: none"> • Epi seul (grain + rafle) • Grain seul broyé. 	<ul style="list-style-type: none"> • grande pauvreté en PDI et en acides aminés essentiels (méthionine, cystine, lysine, tryptophane ...) • grande pauvreté en matières minérales (Ca, P, oligo-éléments) et en vitamine A <p><u>Des chiffres / kg de MS (plante entière)</u></p> <p>MS : 25 % à 35 % UFL : 0,85 à 0,90 UFV : 0,75 à 0,80 PDIN : 50 à 60 PDIE : 65 à 70</p>	<ul style="list-style-type: none"> • épis + rafle pour bovins de boucherie <p>AVANTAGES</p> <ul style="list-style-type: none"> - hauts rendements, - se complète très bien par les tourteaux, - ensilage facile et de bonne conservation, - aliment très appétible. <p>INCONVÉNIENTS</p> <ul style="list-style-type: none"> - peut abaisser le pH du rumen (acidose), - peut abaisser le taux butyreux - peut causer mortalité et chétivité de veaux faute de vitamine A, - coût élevé de la complémentation.
<p>LES FOURRAGES VERTS ANNUELS PATURÉS OU DISTRIBUÉS EN VERT</p> <p>Constituants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • LÉGUMINEUSES : vesce, féverole, trèfle d'Alexandrie... • GRAMINÉES : seigle, avoine, blé, orge, maïs, sorgho... • CRUCIFÈRES et divers : colza, chourave, navet, moutarde <p>Associations fréquentes :</p> <p>avoine – vesce / seigle-vesce Seigle -pois-féverole / maïs-pois-vesce</p>	<p>Se caractérisent par :</p> <ul style="list-style-type: none"> • leur valeur alimentaire équilibrée, due au mélange graminées + légumineuses ou crucifères, • leur digestibilité élevée, due au stade de récolte précoce et leur appétibilité, • leur haute teneur en minéraux et vitamines, surtout quand le pourcentage de légumineuses est élevé. <p><u>Des chiffres / kg de MS</u></p> <p>MS : 15 à 30 %.</p> <p>Graminées Légumineuses Crucifères</p> <p>UFL 0,65 à 1 0,70 à 0,95 0,80 à 0,95 UFV 0,60 à 0,95 0,60 à 0,90 0,70 à 0,90 PDIN 45 à 90 95 à 125 90 à 120 PDIE 60 à 100 85 à 100 85 à 95</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Limitent les achats de concentrés azotés. • Sont à la fois des aliments de valeur et des améliorateurs du sol (engrais verts). • Assurent des rendements annuels élevés : compte tenu de leur rapidité de pousse, et de leur occupation du sol en hiver, deux cultures peuvent se succéder dans l'année.
<p>LES CHOUX FOURRAGERS</p>	<p>Se caractérisent par leur richesse en PDI et en soufre.</p> <p><u>Des chiffres / par kg de MS</u></p> <p>MS : varie avec la saison, de 11 à 15 %. UFL : 1 à 1,04 UFV : 1 à 1,02</p>	<p>Les choux présentent à la fois un intérêt TECHNIQUE :</p> <ul style="list-style-type: none"> • très appétibles, • favorisent la production laitière. <p>et ECONOMIQUE:</p>

	<p>PDIN : 105 à 110</p> <p>PDIE : 98 à 100</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Permettent d'économiser les concentrés azotés à cause de leur richesse en PDI • peuvent se pâturer quand le temps et le sol le permettent. <p>Ne pas les employer pour jeunes bovins de moins de 2 ans (freinent la croissance).</p>
<p>LES POMMES DE TERRE</p> <p>Appartiennent surtout à des variétés très productives riches en fécule.</p>	<p><u>Leur valeur est à peu près constante :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • assez riches en MS : 20 %. • riches en amidon, donc en UF : 1,2 UFL et UFV. • très pauvres en PDI : 63 g de PDIN, et 103 g de PDIE. 	<p>Aliment d'engraissement à cause de sa valeur énergétique, la pomme de terre s'emploie pour les bovins à l'engrais : crue, à raison de 15 à 20 kg en fin d'engraissement.</p>
<p>LES BETIERAVES</p>	<p><u>Leur valeur dépend :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • de la variété • de la sécheresse ou de l'humidité de l'année, et de la fumure reçue. <p><u>Des chiffres / kg de MS</u></p> <p>MS : 8 à 22 %.</p> <p>ENERGIE, très riches : UFL : 1, 10 à 1,15 UFV : 1,14 à 1,16</p> <p>MATIÈRES AZOTÉES, pauvres : PDIN : 50 à 60 PDIE : 85 à 90</p> <p>Vitamines : pauvres en vitamine A.</p>	<p>Les betteraves retrouvent tout intérêt :</p> <ul style="list-style-type: none"> • pour les vaches laitières : elles stimulent la flore microbienne et l'appétit, • pour les jeunes animaux qui ne pas consommer des choux (génisses) • pour l'engraissement des bovins : leur très faible encombrement permet une consommation énergétique élevée et laisse "la place" pour la consommation de fourrages riches en PDI (foin ou ensilage de luzerne)
<p>LES CÉRÉALES</p> <p>Avoine, blé, blé dur, maïs, orge, riz, seigle, sorgho, triticale</p>	<p><u>Les céréales se caractérisent par :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Leur RICHESSSE EN UF qui tient à leur pauvreté en cellulose (sauf l'avoine) et à leur richesse en amidon. • Leur PAUVRETÉ EN PDI, pauvreté en quantité par rapport à l'énergie (rapport PDI/UF faible). <ul style="list-style-type: none"> • Pauvreté en qualité des matières azotées : faible taux d'acides aminés indispensables, surtout le maïs très pauvre en lysine et en tryptophane. 	<p>Aliments énergétiques concentrés, céréales sont employées :</p> <ul style="list-style-type: none"> • comme base de l'alimentation énergétique des volailles parfois des jeunes bovins et ovins. • comme aliment d'engraissement pour bovins, ovins, ou volaille • comme correcteur énergétique des rations pour

	<p>Mais ces caractéristiques sont variables selon les céréales.</p> <p style="text-align: center;"><u>Des chiffres / kg brut</u></p> <p>MS : 86 à 88 % .</p> <p>ENERGIE : 0,9 à 1,15 UFL et UFV.</p> <p>Les plus riches : maïs, avoine décortiquée, blé, triticales.</p> <p>Les moins riches : avoine, millet.</p> <p>MATIÈRES AZOTÉES</p> <p>PDIN : pauvres, 65 à 70 : avoine, maïs, orge, riz, seigle, sorgho. Plus riches, 70 à 95 : avoine décortiquée, blé, triticales.</p> <p>PDIE : pauvres, 75 à 90 : avoine, orge, seigle. Plus riches, 95 à 105 : blé, blé dur, maïs, millet, riz, triticales.</p> <p>Matières minérales : les céréales sont riches en P et pauvres en Ca. Mais les 2/3 du P sont sous forme de phytique, peu assimilable par les volailles.</p> <p>Vitamines : pauvres en vitamines A et D, riches en vitamines B et E.</p>	<p>vaches laitières excédentaires en MAD (herbe pâturée).</p> <ul style="list-style-type: none"> comme composant énergétique des aliments équilibrés pour vaches laitières, en association à des tourteaux. <p>Aliments appétibles, les céréales sont distribuées le plus souvent aplaties ou en farines ou en granulées.</p>
<p>LES TOURTEAUX</p> <p>Principaux tourteaux utilisés en alimentation animale :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Arachide - Cacao - Colza - Coton - Lin - Palmiste - Sésame - Soja - Tournesol 	<p>Les tourteaux se caractérisent par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Leur grande RICHESSSE EN PDI, avec des teneurs variables en acides aminés indispensables, excellentes dans le cas du soja - Leur RICHESSSE EN UF, comparable à celle des céréales, - Leur RAPPORT PDI/UF très élevé. <p style="text-align: center;"><u>Des chiffres par kg brut</u></p> <p>MS : 88 à 92 % UFL : 0,80 à 1,10 UFV : 0,70 à 1,05 PDIN : 150 à 370 PDIE : 115 à 330</p> <p>Les plus riches : arachide, colza, coprah, soja</p> <p>Matières minérales : plus riches en P et Ca que les céréales.</p> <p>Vitamines : dépourvus de vitamines liposolubles, mais plus riches que les céréales en vitamines B.</p>	<p>Aliments azotés concentrés, les tourteaux sont moins coûteux que les protéines d'origine animale. Ils sont employés :</p> <ul style="list-style-type: none"> comme COMPLÉMENTS DES CÉRÉALES dans les aliments composés pour toutes les espèces animales. <p>On les choisit en fonction de leur teneur en acides aminés. Ex: l'association maïs, pauvre en lysine, + tourteau de soja, riche en lysine.</p> <ul style="list-style-type: none"> comme CORRECTEURS des rations pour bovins ou ovins pauvres en PDI, cas fréquent dans l'alimentation des vaches laitières. comme aliment d'ENGRAISSEMENT des

		bovins, du fait de leur teneur en matières grasses et de leur appétibilité.
<p>LES LÉGUMINEUSES A GRAINES</p> <ul style="list-style-type: none"> • pois • vesce • féverole • soja • lupin. 	<p>Se caractérisent par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Leur richesse en PDI, inférieure à celle des tourteaux mais très supérieure à celle des céréales, - Leur richesse en UF, comparable à celle des céréales, leur rapport PDI/UF assez élevé <p style="text-align: center;"><u>Des chiffres / kg brut</u></p> <p>MS : 86 à 90 %.</p> <p>UFL et UFV : 1 à 1,05.</p> <p>PDIN : 150 à 250.</p> <p>PDIE : 70 à 200.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aliments azotés et énergétiques concentrés destinés à remplacer de plus en plus les tourteaux importés. • S'utilisent soit pures comme correcteur azoté, soit en mélange avec des céréales pour constituer des aliments à PDI/UF variable. • Peuvent se cultiver en mélange avec une ou plusieurs céréales (avoine, seigle, blé), le mélange récolté étant écrasé pour être distribué comme concentré équilibré.
<p>LES ALIMENTS D'ORIGINE ANIMALE</p> <p>Le lait et ses sous-produits</p> <ul style="list-style-type: none"> • lait entier (naturel / reconstitué) • lait écrémé (frais / sec) • babeurre • lactosérum <p>Farines animales</p> <ul style="list-style-type: none"> • farines de viande (d'animaux entiers, de déchets, d'os...) • farines de sang • farines de poissons (de poissons entiers, de déchets, de "solubles de poissons") 	<p>Se caractérisent par :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leur grande richesse en MATIÈRES AZOTÉES de haute valeur biologique, • une richesse en UF élevée, mais variable surtout selon la teneur en matière grasse. • une grande richesse minérale, en phosphore et calcium • une richesse variable en vitamines, particulièrement pour la vitamine B. <p style="text-align: center;"><u>Des chiffres / kg de MS</u></p> <p>Lait et sous-produits :</p> <p>UF : 1,50 à 2 UF/kg de MS.</p> <p>PDI/UF : 200 à 250.</p> <p>Farines animales :</p> <p>UF : 0,8 à 1,5 UF/kg de MS.</p> <p>PDIN : 350 à 600. PDIE : 250 à 500.</p>	<p>Le lait et les sous-produits laitiers sont employés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • soit pour l'allaitement artificiel ou l'engraissement des jeunes, • soit comme composants d'aliments de démarrage des jeunes animaux, en mélange avec d'autres composants.

1.1.3. Aliments composés

1.1.3.1. Aliments composés complets

Sont des mélanges d'aliments qui, grâce à leur composition, suffisent à assurer une ration

journalière.

1.1.3.2. Aliments composés complémentaires

Sont des mélanges d'aliments contenant un taux élevé de certaines substances, et qui, en raison de leur composition, n'assurent la ration journalière que s'ils sont associés à d'autres aliments.

Parmi ceux-ci, une mention particulière est faite pour :

- ✚ Les aliments mélassés, aliments complémentaires préparés à partir de mélasse, et contenant au moins 14% de sucres totaux exprimés en saccharose ;
- ✚ Les aliments minéraux correspondant à appellation "CMV" et dont la combustion laisse au moins 40 % de cendres.

Références bibliographiques

1. Agabriel, J., Aufrère, J., Baumont, R., Bocquier, F., Bonnefoy, J.-C., Champciaux, P., Delagarde, R., Delaby, L., D'Hour, P., Dulphy, J.-P., Faverdin, P., Garcia, F., Giger-Reverdin, S., Hassoun, P., Meschy, F., Micol, D., Nozières, M.-O., Peyraud, J.-L., Pomiès, D., Sauvant, D., & Tran, G. (2010). *Alimentation des bovins, ovins et caprins: Besoins des animaux – Valeurs des aliments. Tables Inra 2007, mise à jour 2010*. Éditions Quæ.
2. Brocard, V., Brunschwig, P., Legarto, J., Paccard, P., Rouille, B., & Bastien, D. (2010). *Guide pratique de l'alimentation du troupeau bovin laitier*. L'Institut de l'élevage.
3. Chavez Montes, R. A. (2008). *Caractérisation de mutants et transformants d'alpha-L-arabinofuranosidase chez Arabidopsis thaliana* (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
4. CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement). *L'assolement dans les systèmes fourragers des zones tropicales*. Disponible sur : (<https://www.cirad.fr>).
5. Drogoul, C., Gadoud, R., Joseph, M.-M., Jussiau, R., Lisberney, M.-J., Mangeol, B., Montméas, L., & Tarrit, A. (2004). *Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Tome 1: Les bases théoriques de l'alimentation - les principes de raisonnement de l'alimentation*. Educagri.
6. Drogoul, C., Gadoud, R., Joseph, M.-M., Jussiau, R., Lisberney, M.-J., Mangeol, B., Montméas, L., & Tarrit, A. (2010). *Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Tome 2: L'alimentation des monogastriques, l'alimentation des polygastriques*. Educagri.
7. FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). *Grassland Management and Assolement Systems*. Disponible sur : (<http://www.fao.org/grassland/management/en/>).
8. Hopkins, A., & Wilkins, R. J. (2006). *Grassland Production and Utilization*. Dans *Principles of Grassland Management*. CAB International.
9. INRAE (Institut national de la recherche agronomique). *Guide Pratique de l'Assolement en Prairie et Systèmes Fourragers*. Disponible sur : (<https://www.inrae.fr>).

10. INRAE (Institut national de la recherche agronomique). *Les systèmes fourragers: diversité et adaptation*. Disponible sur : (<https://www.inrae.fr>).
11. Jean-Blain, C. (2002). *Introduction à la nutrition des animaux domestiques*. Edition Tec et Doc.
12. Klein, H.-D., Rippstein, G., Huguenin, J., Toutain, B., & Guerin, H. (2013). *Les cultures fourragères*. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2169-1>
13. Meschy, F. (2010). *Nutrition minérale des ruminants*. Éditions Quæ.
14. Raaf, N., & Griene, L. (2015). *Glucides (structures et métabolisme)*. Université Benyoucef Benkhedda. <http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/bioch1an16-glucides.pdf>