



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل

Université Mohammed Seddik Benyahia-Jijel



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de l'Enseignement Fondamental

des Sciences de la Nature et de la Vie

كلية علوم الطبيعة والحياة

قسم التعليم الأساسي لعلوم الطبيعة والحياة

Agronomie 2 / Partie Animal

Polycopié de cours

2^{ème} année Licence Sciences Agronomiques

Code du cours : UEF 2.2.1

Préparé par Dr FAR Zahir

Grade : MCB

2024/2025

Ref.....

Avant-propos

Ce document pédagogique, intitulé Agronomie 2/ partie Animal, est destiné aux étudiants de deuxième année en sciences agronomiques. Il a pour objectif d'offrir un cadre clair et structuré sur les bases de la nutrition animale, un pilier fondamental pour une production animale efficiente et respectueuse des exigences actuelles en matière de durabilité et de bien-être animal.

Le contenu s'organise en cinq chapitres complémentaires. Le premier chapitre présente la constitution et l'utilisation des aliments, en mettant en évidence les différents types d'aliments et leurs caractéristiques nutritionnelles. Le deuxième chapitre s'intéresse aux mécanismes de la digestion selon les espèces animales, en tenant compte des particularités anatomiques et physiologiques qui influencent la transformation des aliments.

Les chapitres suivants abordent successivement les trois grands types de besoins nutritionnels des animaux : l'énergie (chapitre III), les éléments azotés (chapitre IV) et les apports minéraux et vitaminiques (chapitre V). Chacun de ces thèmes est traité en lien avec les fonctions biologiques de l'animal, ses performances et les exigences pratiques de l'alimentation en élevage.

Ce support a été conçu pour accompagner les étudiants dans leur apprentissage, en leur fournissant des repères essentiels pour comprendre la nutrition animale et ses implications concrètes. Il prépare également à une approche plus pratique lors des travaux dirigés ou des autres activités pédagogiques.

Nous espérons que ce document contribuera à renforcer les compétences des futurs professionnels du secteur agronomique, et les aidera à mieux appréhender les enjeux alimentaires dans les systèmes de production animale modernes.

Dr FAR Z

Table des matières

Introduction	1
1. Utilisation et constitution des aliments	2
1.1. Notion d'aliment et d'alimentation	2
1.1.1. Les glucides	2
a. Les glucides intracellulaires	3
b. Les glucides pariétaux	3
1.1.2. Les matières azotées	3
1.1.3. Les lipides	4
1.2. Anatomie comparée de l'appareil digestif	6
1.2.1. L'appareil digestif des animaux monogastriques	6
1.2.2. L'appareil digestif des ruminants	7
1.2.3. Les glandes annexes	9
1.3. Adaptation Anatomique de l'appareil digestif aux mécanismes de la digestion	9
2. Actions digestives des différentes espèces animales	11
2.1. Actions digestives chez les ruminants	11
2.1.1. Processus physiques	11
2.1.2. Processus biochimiques	11
2.2. Actions digestives chez la poule	14
2.3. Actions digestives chez le lapin	14
3. Alimentation énergétique	16
3.1. Importance de l'alimentation énergétique chez l'animal	16
3.2. Besoins alimentaires	16
3.2.1. La dépense d'entretien	16
3.2.1.1. Le métabolisme de base (MB)	16
3.2.1.2. Facteur de variation du métabolisme de base (MB)	17
3.2.1.3. La dépense énergétique d'entretien	17
3.2.2. Besoins énergétiques de production	18
a. Croissance	18
b. Production laitière (lactation)	18
c. Gestation	19
d. Production de la laine	19
e. Production des œufs	19
f. Production de chair	20
g. Production de travail	20
3.3. Transformation et utilisation de l'énergie alimentaire chez l'animal	20
3.3.1. Energie brute (EB)	20
3.3.2. Energie digestible (ED)	21
3.3.3. Energie métabolisable (EM)	21
3.3.4. Energie nette (EN)	21
3.4. Les système d'expression de l'énergie	22

3.4.1. Les système basés sur l'ED, l'EM et l'EN	22
3.4.2. Système d'unités d'évaluation de l'apport énergétiques des ruminants	23
3.5. Effets de carence ou excès nutritionnels	23
3.5.1. Effets sur le nouveau-né	23
3.5.2. Effets sur la croissance et le développement	23
3.5.3. Effets sur les réserves corporelles	24
3.5.4. Effets sur la reproduction	24
3.5.5. Effets sur la production	25
3.5.6. Maladies métaboliques	25
4. Alimentation azotée	26
4.1. Importance de l'alimentation azotée	26
4.2. Besoins alimentaires en matières azotées	27
4.2.1. Considérations qualitatives des besoins en matières azotées	27
4.2.2. Évaluation de la dépense azotée	28
a. Besoins d'entretien	28
b. Besoins azotées de production	29
c. Le système de mesure PDI (Protéines Digestibles dans l'Intestin)	31
4.3. Effets de carence ou excès nutritionnels	31
4.3.1. Effets sur l'ingestion	32
4.3.2. Effet sur l'activité microbienne chez les ruminants	32
4.3.3. Effets sur le poids	32
4.3.4. Effets sur la croissance	32
4.3.5. Effets sur les productions	32
4.3.6. Effets sur la reproduction	32
4.3.7. Effets sur la santé	33
4.3.8. Effets sur l'environnement	33
5. Alimentation minérale et vitaminique	34
5.1. Importance de l'alimentation minérale et vitaminique	34
5.2. Besoins alimentaires en minéraux et en vitamines	35
5.2.1. Besoins en minéraux et vitamines chez les ruminants	35
5.2.1.1. Les éléments minéraux majeurs	35
a. Besoins d'entretien en éléments minéraux majeurs	35
b. Besoins de production en éléments minéraux majeurs	35
5.2.1.2. Le soufre les oligoéléments minéraux majeurs	36
5.2.1.3. Les vitamines	37
5.2.2. Besoins en minéraux et vitamines chez les oiseaux	37
5.2.2.1. Oiseaux en croissance	37
5.2.2.2. Pondeuses	38
5.3. Effets de carence ou excès nutritionnels	38
5.3.1. Les minéraux majeurs	38
5.3.2. Les oligoéléments minéraux	39
5.3.3. Les vitamines	40
Références bibliographiques	41

Liste des tableaux

Tableau 01 : Les différents constituants des aliments.	2
Tableau 02 : Classification des matières azotées. .	4
Tableau 03 : Zone de neutralité thermique de différentes catégories d'animaux (en °C).	17
Tableau 04 : Quantité d'énergie fixée dans le croît de bovins de race, sexe et poids différents (Kcal/kg de croît de la masse corporelle).	18
Tableau 05 : Composition moyenne d'un Kg de lait de différentes espèces.	19
Tableau 06 : Estimation du besoin du poulet en quelques acides aminés indispensables.	21
Tableau 07 : Besoin du poulet de chair en protéines, lysine et acides aminés soufrés selon l'âge (g/100g de gain de poids).	21
Tableau 08 : Prévision du besoin d'entretien en éléments minéraux majeurs absorbés (en g/j).	35
Tableau 09 : Prévision des besoins de production en éléments minéraux majeurs absorbés (en g/j.).	36
Tableau 10 : Apports journaliers recommandés globaux (entretien + production) de phosphore et de calcium basés sur le besoin énergétique.	36
Tableau 11 : Apports journaliers recommandés (AJR) en oligo-éléments en mg/kg de MS de la ration.	37
Tableau 12 : Apports journaliers recommandés en vitamines en UI/kg de MS selon la proportion d'aliments concentrés de la ration.	37
Tableau 13 : Recommandations en macroéléments des oiseaux en croissance (g/1000 kcal d'énergie métabolisable).	38
Tableau 14 : Addition recommandées de vitamines dans les aliments destinés aux pondeuses (en croissance ou en ponte) (UI ou ppm = g/tonne)	38
Tableau 15 : Principaux symptômes de carences des oligoéléments.	39
Tableau 16 : Effets de carence et d'excès pour les principales vitamines sur les animaux.	40

Liste des tableaux

Figure 01 : Le tube digestif du cheval.	7
Figure 02 : Le tube digestif du bovin adulte.	8
Figure 03 : Système digestif des oiseaux (tube digestif + glandes annexes).	9
Figure 04 : Schéma de la digestion des glucides chez le ruminant.	12
Figure 05 : Schéma de la digestion des lipides chez le ruminant.	13
Figure 6 : Schéma de la digestion des matières azotées chez le ruminant.	13
Figure 07 : Représentation schématique de la digestion chez le poulet	14
Figure 8 : la digestion chez le lapin.	15
Figure 09 : Schéma général d'utilisation de l'énergie par les ruminants.	22

Introduction

L'alimentation des animaux d'élevage joue un rôle essentiel dans la réussite des systèmes de production animale. Elle conditionne non seulement les performances zootechniques (croissance, reproduction, production), mais aussi la santé des animaux, la qualité des produits, et l'impact environnemental de l'élevage. Dans un contexte où les exigences en matière de durabilité, d'efficacité et de bien-être animal sont de plus en plus fortes, comprendre les principes fondamentaux de la nutrition animale est devenu indispensable pour les futurs agronomes.

La matière Agronomie 2 / partie "animal" a pour objectif de fournir aux étudiants de deuxième année en sciences agronomiques une base solide en nutrition animale. Il approfondit les connaissances acquises en première année, en abordant les grands types d'aliments et leurs constituants, les processus digestifs selon les espèces, et les besoins alimentaires spécifiques des animaux.

Ce document s'organise en cinq chapitres complémentaires. Le premier chapitre traite de la composition des aliments et de leur utilisation. Le deuxième explore les mécanismes de digestion propres aux différentes espèces animales. Les trois derniers chapitres sont consacrés aux besoins nutritionnels des animaux : besoins énergétiques (chapitre III), azotés (chapitre IV), puis minéraux et vitaminiques (chapitre V).

À travers ces notions, les étudiants acquièrent les connaissances nécessaires à l'évaluation des besoins alimentaires, l'importance des nutriments et l'effet de l'excès ou de la carence de chacun de ceux-ci. Ce cours constitue ainsi une base indispensable pour aborder par la suite des disciplines telles que la zootechnie, la gestion des élevages, ou encore la formulation alimentaire.

1. Utilisation et constitution des aliments

1.1. Notion d'aliment et d'alimentation

Un aliment est une substance complexe dont l'ingestion chez les animaux permet la couverture des besoins nutritionnels pour l'entretien et les différentes productions.

Lors de leur digestion, les aliments sont transformés en éléments simples, les nutriments, sont absorbés par la muqueuse du tube digestif et utilisés dans les cellules des différents tissus de l'organisme pour leur métabolisme.

Tous les aliments sont constitués des mêmes composants : eau, matières minérales, glucides, lipides et matières azotées (tableau 01).

Par dessiccation de l'aliment, on obtient la matière sèche (MS). La matière sèche calcinée laisse un résidu appelé cendres ou matières minérale (MM) ; la masse qui a disparu lors de la calcination est appelée matière organique (MO). On calcule : **MO = MS – MM**

Les composants de la matière organique sont des glucides, des lipides et des matières azotées.

Tableau 01 : Les différents constituants des aliments (Drogoul et *al.*, 2004).

Aliment (matière brute)	Eau				H ₂ O
	Matière sèche (MS)	Matière minérale (MM)		Macroéléments	Chlore, phosphore, soufre, Calcium, sodium, magnésium, Potassium
				Oligoéléments	Fer, Cuivre, Zinc, Cobalt, Manganèse, Iode, Sélénium, etc.
		Matière organique (MO)	Glucides	Glucides cytoplasmiques	Pentoses, Hexoses (glucose, fructose, etc.) Saccharose, maltoses, lactose, mélibiose Fructosanes, Amidons, etc.
				Glucides pariétaux et végétaux	Cellulose, hémicellulose Substances pectiques (lignine)
			Lipides	Lipides	Glycérides, Stérides, Cérides
			Matières azotées	Matières azotées protidiques	Acides aminés libres Combinaisons d'acides aminés (peptides, polypeptides, protéines)
				Matières azotées non protidiques	Amides (urée, etc.) Amines Ammoniaque Bases azotées

1.1.1. Les glucides

On distingue deux grandes catégories de glucides selon leur localisation dans la cellule végétale : les glucides cytoplasmiques ou intracellulaires et les glucides pariétaux.

a. Les glucides intracellulaires

Les glucides intracellulaires sont constitués des sucres hydrosolubles, des grains d'amidon et des fructosanes. Les sucres hydrosolubles représentent en général moins de 10% de la matière sèche des aliments d'origine végétale, à l'exception de quelques graminées jeunes, des betteraves et de la mélasse qui sont beaucoup plus riches. La concentration maximale est atteinte avant le début de l'épiaison des graminées et peu avant le début du bourgeonnement des légumes. Les amidons ne sont abondants que dans les grains, les tubercules et leurs sous-produits. Ils sont mis en réserve dans les plastides des cellules végétales. Les fructosanes s'accumulent à la base des tiges des graminées.

b. Les glucides pariétaux

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

La cellulose est formée de longues chaînes de molécules de glucose dont les liaisons osidiques ne peuvent être rompues, au cours de la digestion, que par les enzymes bactériennes. Elle est le principal constituant de la paroi secondaire des cellules végétales, des tissus de soutien et des vaisseaux du bois (xylème). Elle est formée de chaînes de β -D glucopyranose toutes reliées entre elles par des liaisons hydrogènes (liaisons faibles).

Les hémicelluloses, formés essentiellement de chaînes de pentoses, sont les principaux constituants de la paroi primaire des cellules végétales. Elles sont souvent associées à la lignine et, par conséquent, sont moins digestibles que la cellulose.

Les substances pectiques, chaînes d'acide uronique, se rencontrent surtout dans les lamelles moyennes des cellules. Ce sont des constituants très digestibles.

La Lignine, formée d'alcools, incruste progressivement les fibres polyosidiques des tissus de soutien et des vaisseaux ligneux. La lignification est d'autant plus importante que le végétal est plus âgé. La lignine est une substance totalement indigestible ; elle rend inaccessible à l'action microbienne les polyosides pariétaux, celluloses et hémicelluloses, auxquels elle s'associe. La teneur en lignine est donc le principal facteur de variation de la digestibilité des aliments d'origine végétale.

1.1.2. Les matières azotées

Les matières azotées sont surtout présentes dans le cytoplasme des cellules ; ils font l'objet d'une classification fondée sur leur nature chimique et leur solubilité (Tableau 02).

Tableau 02 : Classification des matières azotées (Drogoul et *al.*, 2004)..

Matières azotées totales (*)		Classification	
		Chimique	Selon la solubilité
		Matières azotées protidiques	Matières azotées protéiques ou protéiniques
	Protéines (de plus de 100 AA) : - hétéroprotéines - holoprotéines Polypeptides complexes (de 10 à plus de 100 AA) Acides aminées		
	Bases azotées (formes cycliques, constituants des acides nucléiques) Amines, amides Formes azotées simples (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+)	Matières azotées non protidiques	Matières azotées non protéiques ou non protéiniques

(*) : Le terme de protéines brutes, qui figure sur les étiquettes d'aliments de bétail, est équivalent.

a. La classification chimique

Les matières azotées protidiques donnent par hydrolyse des acides aminés. Elles comportent les protéines, les peptides (oligopeptides, de deux à dix acides aminés, et polypeptides) et les acides aminés libres.

Les matières azotées non protidiques ne sont pas constituées d'acides aminés. Ce sont les amines, les amides (urée), les formes azotées simples (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+) et les bases azotées des acides nucléiques.

b. La classification selon la solubilité

Les matières azotées non protéiques sont solubles dans l'éthanol à 80% ou l'acide trichloracétique à 10%. Localisées dans les vacuoles des cellules, elles sont donc rapidement accessibles lors de la digestion ; une teneur élevée en matières azotées non protéiques reflète l'intensité de la protéolyse réalisée dans certains aliments comme les ensilages. Les matières azotées protéiques non solubilisées dans les solvants sont constituées essentiellement de protéines.

1.1.3. Les lipides

Chez les végétaux, les constituants lipidiques sont localisés dans les chloroplastes des cellules, les germes des grains, la cuticule des feuilles. Ce sont en général des triglycérides, c'est-à-dire des esters d'acides gras (AG) et de glycérol.

La matière grasse est caractérisée par les différents acides gras qui la composent. Les acides gras sont classés en fonction :

- du nombre d'atomes de carbone : AG volatils (C1 à C4). AG moyens (C6 à C14), AG longs (C16 à C22) ;
- du nombre de doubles liaisons dans leur chaîne carbonée, c'est-à-dire du degré d'insaturation.

En alimentation animale, on distingue les aliments simples, matières premières d'origine végétale, animale ou minérale, et les aliments composés, formés par plusieurs aliments simples et ayant des spécifications nutritionnels en fonction de leur utilisation.

Parmi les aliments simples :

Les fourrages :

- Aliments grossiers (riches en constituants pariétaux) : fourrages verts, foin, ensilages
- Aliments succulents (riche en eau) : racines, tubercules...

Les aliments concentrés (à fort Tx de MS)

- Aliments concentrés énergétiques riches en glucides (grains des céréales), ou en lipides (huiles végétales, graisses animales)
- Aliments concentrés azotés (graines oléo-protéagineuses, tourteaux, produits d'origine animale)
- Aliments minéraux (sel, craie phosphatée,...) ou vitaminique.

Les aliments composés sont des mélanges des divers aliments simples, obtenus par formulation de façon à répondre aux exigences nutritionnelles particulières selon les types d'animaux auxquels ils sont destinés et les objectifs de productions souhaitées.

Il peut s'agir d'aliment complet assurant les besoins nutritionnels des animaux, que l'on utilise chez les monogastriques ou les jeunes pré-ruminants ou des aliments complémentaires destinés à équilibrer ou compléter la ration de base généralement produite sur l'exploitation (aliments correcteurs azotés, ...)

Certaines phases physiologiques délicates dans la vie de l'animal peuvent nécessiter l'utilisation d'aliment particulier (aliments de démarrage ou 1^{er} âge, aliments de sevrage ou de post-sevrage, aliment de transition, aliments médicamenteux)

Certaines phases physiologiques délicates dans la vie de l'animal peuvent nécessiter l'utilisation d'aliment particulier (aliments de démarrage ou 1^{er} âge, aliments de sevrage ou de post-sevrage, aliment de transition, aliments médicamenteux)

Les pré-mélanges, les aliments complémentaires minéraux (CM), les aliments complémentaires minéraux et vitaminisés (CMV) représentent des types particuliers d'aliments composés élaborés par des firmes-services de l'alimentation animale à partir de M1^{ères} minérales et de vitamines de synthèse, auxquels s'ajoute d'éventuels additifs.

L'**alimentation** est une technique d'apport à l'animal des différents nutriments. Cette technique repose sur :

- Le calcul des besoins de l'animal à différents stades
- L'évaluation des valeurs nutritives des aliments

- L'apport de l'aliment à l'animal pour couvrir ces besoins

La nutrition se fixe comme objectif de connaître la dépense énergétique, protéique, minéraux, vitamines et eau de l'animal dans une situation de production donnée, afin d'apporter les aliments nécessaires pour atteindre un niveau de production donnée.

Donc L'**alimentation** repose sur la mise en œuvre de systèmes d'unités mesurant les flux dans l'organisme de chaque nutriment indispensable (énergie, azote, minéraux, vitamines)

Ces systèmes d'unités doivent caractériser la valeur alimentaire des aliments, variables selon la composition des aliments et les traitements technologiques subis, en même temps que les besoins des animaux (entretien, production) qui dépendent du niveau et de la nature de la production zootechnique assurée.

Ils permettent ainsi de quantifier, d'une part, l'offre des aliments, et d'autre part, la demande de l'organisme animal

Le principe de calcul des rations alimentaires s'appuie sur ces systèmes d'unité en recherchant un équilibre judicieux entre les apports des aliments et les besoins de l'animal exprimés sous forme de recommandations alimentaires.

1.2. Anatomie comparée de l'appareil digestif

L'appareil digestif qui va de la bouche à l'anus, est destiné à transformer les aliments en nutriments.

Il est constitué de deux ensembles : *le Tube Digestif* et *les Glandes Annexes*.

En classant les animaux d'élevage selon leur physiologie digestive, nous distinguons deux types :

- les animaux non-ruminants (ou monogastriques) comme les volailles, les équins et les lapins ;
- et les ruminants (ou poly-gastriques) comme les bovins, les ovins et les caprins.

1.2.1. L'appareil digestif des animaux monogastriques

Le tube digestif des monogastriques comprend : la bouche (ou cavité buccale), l'œsophage, l'estomac (un seul), l'intestin grêle, le gros intestin puis le rectum (figure 01).

La bouche (ou cavité buccale) assure la préhension et la mastication des aliments.

L'œsophage est un conduit permettant le passage du bol alimentaire vers l'estomac.

L'estomac est une poche relativement volumineuse. C'est le siège de processus de dégradation des aliments (digestion) dont deux activités intenses s'y déroulent : i) une activité mécanique (brassage et broyage) et, ii) une activité chimique (ou enzymatique).

L'intestin grêle est un long tube composé de trois parties : le duodénum, le jéjunum et l'iléon. Il reçoit des sécrétions du foie, du pancréas et de sa muqueuse et sous muqueuse ayant un rôle important dans la digestion et l'absorption.

Le gros intestin est développé chez les équins et les lapins mais peu développé chez les volailles. Il comprend le cæcum, le colon et le rectum. Il abrite une population microbienne similaire à celle du rumen d'un ruminant mais moins nombreuse.

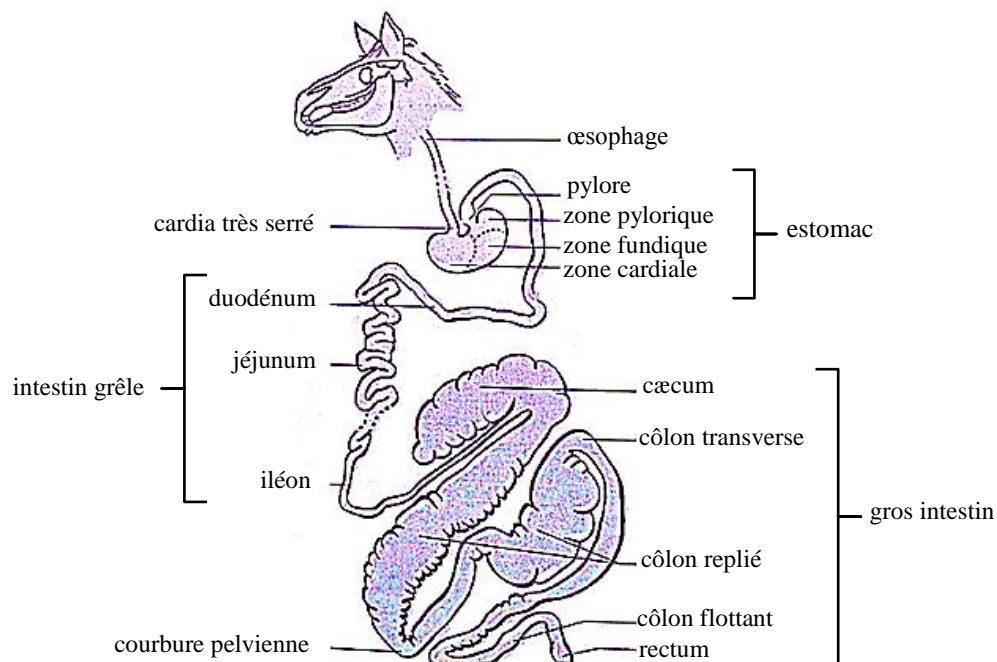


Figure 01 : Le tube digestif du cheval (Drogoul et *al.*, 2004).

1.2.2. L'appareil digestif des ruminants

Le tube digestif du ruminant est polygastrique (plusieurs estomacs). Il présente aussi certaines particularités par rapport à celui des monogastriques. La figure 02 montre le tube digestif d'un ruminant (bovin adulte).

La cavité buccale assure la préhension des aliments (par la langue chez les bovins et par les lèvres chez les ovins) et la rumination. La denture est caractérisée par l'absence des incisives supérieures contrairement aux monogastriques. La cavité buccale assure aussi une forte insalivation, la mastication, le broyage des aliments.

L'œsophage est un tube qui va du pharynx au rumen en rétrécissant ; de ce fait, un bovin peut s'étrangler avec un objet arrondi tel qu'une pomme.

Les estomacs (ou poches gastriques)

Chez le ruminant, le tube digestif comprend quatre poches gastriques distinctes. Le rumen (panse), le réseau (réticulum ou bonnet) et le feuillet (omasum) sont des pré-estomacs alors que la caillette (abomasum) est un estomac proprement dit.

Le rumen est le plus volumineux de ces réservoirs. Il renferme environ trois quarts du contenu du tube digestif. Sa musculature importante comporte des piliers charnus qui divisent le rumen en deux

sacs. Sa muqueuse, non sécrétrice, porte de nombreuses papilles qui interviennent dans l'absorption. Aussi, le rumen est colonisé par une forte population de micro-organismes qui permettent la dégradation des aliments.

Le réseau est un petit réservoir situé entre le rumen et le diaphragme. Il joue un rôle capital dans le tri des particules grâce à l'orifice de communication réticulo-omasal.

Le feuillet est appelé ainsi au fait qu'il est formé de lames disposées en série. Il communique en amont avec le réseau par l'orifice réticulo-omasal et en aval avec la caillette par un orifice large et dilatable.

La caillette correspond à l'estomac des monogastrique. Sa muqueuse est sécrétrice. Ses fonctions digestives sont analogues à celles de l'estomac monogastriques.

L'intestin grêle est très long (jusqu'à plus de 40m chez la vache). Il comprend trois parties : le duodénum, le jéjunum et l'iléon. Sa structure et ses mécanismes de digestion et d'absorption sont identiques à ceux des monogastriques.

Le gros intestin, d'une longueur de 10m chez la vache laitière, comprend le cæcum, le colon et le rectum. Il ne secrète pas de sucs digestifs ainsi qu'il a une faible digestion microbienne. Il est le lieu d'absorption et de réabsorption de l'eau.

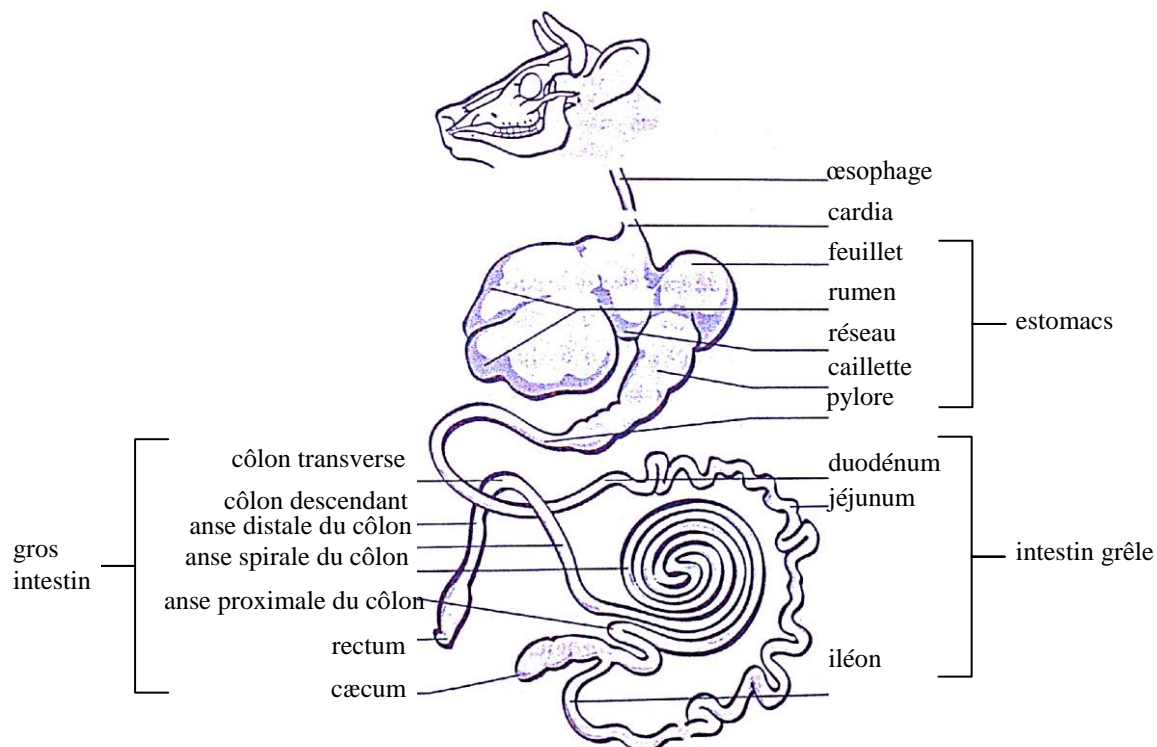


Figure 02 : Le tube digestif du bovin adulte (Drogoul et *al.*, 2004).

1.2.3. Les glandes annexes

Les glandes annexes sont à l'origine des sécrétions digestives. Elles peuvent être individualisées (glandes salivaires, foie, pancréas) ou disséminées dans la paroi du tube digestif (glandes gastriques, glandes intestinales). Les glandes digestives contiennent d'une part des enzymes digestives, d'autre part des substances non enzymatiques : acide chlorhydrique de l'estomac, bile du foie, mucus produit en différents lieux (estomac, intestin grêle, côlon).

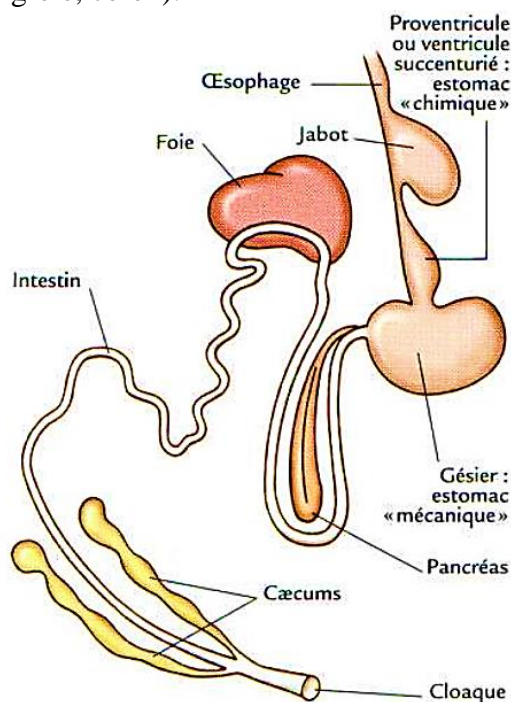


Figure 03 : Système digestif des oiseaux (tube digestif + glandes annexes) (Périquet, 2005).

1.3. Adaptation Anatomique de l'appareil digestif aux mécanismes de la digestion

La relation entre l'organisation de l'appareil digestif et le régime alimentaire des différentes espèces d'animaux domestiques est évidente.

Par rapport à leur tube digestif de monogastrique, les oiseaux se contentent de saisir et de déglutir les aliments. Le broyage des grains est une activité plus ou moins intense.

Le faible développement de l'estomac du cheval et le transit rapide des aliments en son sein ne le prédisposent pas à la digestion gastrique. Toutefois, une multiplication des repas augmente sensiblement son efficacité.

A l'opposé, l'existence de pré-estomac chez les ruminants, associée à un temps de séjour important des aliments, favorise le développement d'une micro-population ruminale de bactéries, protozoaires et champignons dont l'hôte (l'animal) tire un très grand profit.

La cæcotrophie (consommation de certaines fèces appelés cæcotrophes) permet au lapin de compenser cet handicap (valorisation de certains constituants biochimiques après dégradation microbienne).

Pour cette espèce, l'existence d'un estomac et d'un gros intestin bien développé équilibre digestion gastrique et digestion dans le gros intestin.

Au terme de ces éléments, on conclue que :

- Les volailles peuvent être qualifiées d'espèces à digestion gastro-intestinales enzymatique prépondérante.
- Les ruminants sont incontestablement des espèces à digestion essentiellement microbiologiques.
- Les équidés sont capables de tirer parti d'une alimentation à dominance de graines ou de fourrages, ce qui leur confère de larges possibilités d'adaptation.
- Enfin, les régimes destinés aux lapins doivent permettre le développement de l'activité microbienne dans le gros intestin. Leur teneur en parois doit être suffisante.

2. Actions digestives des différentes espèces animales

La finalité de la physiologie digestive est d'approvisionner l'organisme en nutriments nécessaires pour pouvoir assurer les différentes fonctions. Cela est assuré par l'action conjuguée de processus physiques et biochimiques (fonction mécanique, sécrétion, digestion et absorption.).

2.1. Actions digestives chez les ruminants

2.1.1. Processus physiques

Ils commencent par la mastication et se poursuivent tout au long de l'utilisation digestive. Ils assurent et régulent la progression des aliments (Barret., 1992). Les fragments alimentaires résultant sont avalés dans un flot de salive ; ils sont poussés vers l'arrière du rumen par les contractions du rumen-réseau, et s'immergent dans le contenu ruminal. La régurgitation, du bol alimentaire dans la cavité buccale permet la rumination des aliments réingurgités par la suite. La motricité des pré-estomacs assure un brassage important du contenu, favorisant l'activité diastatique (fermentations). Elle assure également le transit vers l'intestin grêle ; le pylore intervient au niveau de sa régulation. L'activité motrice est aussi importante au niveau de l'intestin grêle et du gros intestin.

2.1.2. Processus biochimiques

Le fonctionnement du rumen : l'écosystème ruminal

Le rumen est un écosystème anaérobie strict, peuplé par trois catégories de microorganismes vivant en symbiose avec le ruminant : bactéries, protozoaires et champignons. Ces microorganismes dégradent, via des processus d'hydrolyse et de fermentations, la plupart des composants de la ration alimentaire, dans le but de couvrir leurs besoins et d'assurer leur survie. Ils synthétisent différentes molécules nécessaires à leur développement, telles que des acides aminés et des protéines.

Ces microorganismes sont adaptés à un environnement d'un pH de 6 à 7, en l'absence d'oxygène, à une température de 39 à 40°C et en présence de métabolites issus des fermentations. Les principaux produits des fermentations microbiennes sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'ammoniac (NH₃) et les AGV. En outre, d'importantes quantités de chaleur se dégagent.

La digestion des glucides

Les glucides sont hydrolysés dans le rumen sous l'action des enzymes hydrolytiques microbiennes. Le glucose est le principal produit de ce processus de dégradation. Ce glucose va ensuite être converti par des fermentations microbiennes en un métabolite intermédiaire, l'acide pyruvique. Celui-ci subit une dégradation ultérieure produisant un mélange d'AGV : l'acide acétique, l'acide propionique et l'acide butyrique. L'acide lactique est quant à lui un intermédiaire de cette chaîne de dégradation. Aussi, du CO₂, du CH₄ et de la chaleur sont produits lors de ce processus. Les différents AGV produits sont absorbés à travers la paroi du rumen et constituent pour le ruminant une source

majeure d'énergie, puisqu'ils fournissent 60 à 80 % de l'énergie totale dont il a besoin à l'entretien. Les gaz produits lors des fermentations, le CO₂ et le CH₄, sont quant à eux éliminés par éructation. La vache évacue environ 300 à 400 g de gaz/jour.

Notons que les sucres solubles et l'amidon sont rapidement fermentés alors que les glucides pariétaux (cellulose et hémicellulose) sont dégradés lentement et partiellement (de 30 à 50 %). Enfin, la lignine n'est pas dégradée par le ruminant.

Une fraction de l'amidon non digéré dans le rumen subit une digestion enzymatique dans l'intestin grêle et forme du glucose, absorbé à travers la paroi. L'amidon non digéré dans l'intestin grêle est en partie dégradé par la microflore du gros intestin. Les glucides pariétaux échappant aux fermentations microbiennes peuvent subir aussi une seconde fermentation dans le colon (Figure 04).

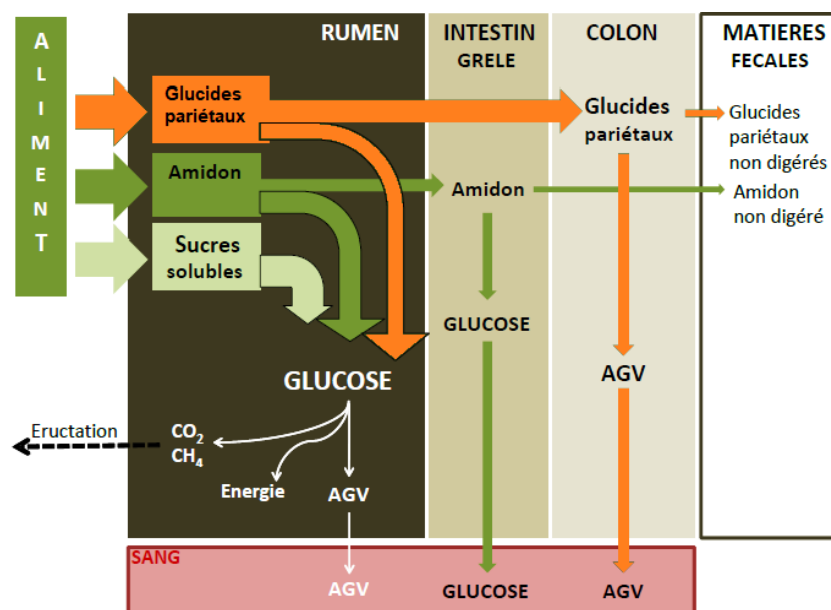


Figure 04 : Schéma de la digestion des glucides chez le ruminant (Cuvelier et *al.*, 2021).

La digestion des lipides

Les lipides alimentaires sont hydrolysés par les microorganismes du rumen, ce qui entraîne la production de glycérol et d'acides gras libres. Le glycérol formé est rapidement fermenté en AGV, alors que les acides gras insaturés sont fortement remaniés par les microorganismes du rumen. Les acides gras libres, fixés aux particules alimentaires, quittent le rumen, passent dans la caillette, puis dans l'intestin grêle, où ils sont digérés et absorbés (Cuvelier et *al.*, 2021).

A côté de leur activité de dégradation des lipides alimentaires, les microorganismes du rumen synthétisent des lipides microbiens, caractérisés notamment par la présence d'acides gras ramifiés. Lorsque ces microorganismes passent du rumen à la caillette, ils sont détruits par le suc gastrique. Ceci entraîne la libération des lipides microbiens, les acides gras libres microbiens rejoignent le pool d'acides gras libres pour subir la digestion et l'absorption intestinales (Figure 05).

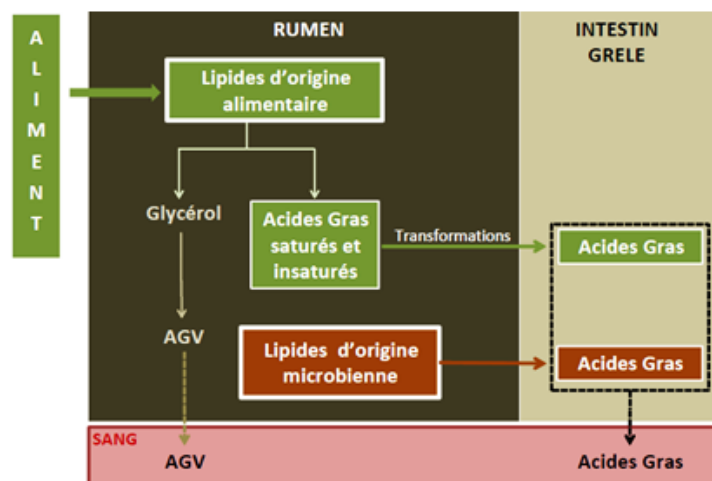


Figure 05 : Schéma de la digestion des lipides chez le ruminant (Cuvelier et *al.*, 2021).

La digestion des matières azotées

Les matières azotées alimentaires (protéines et azote non protéique) subissent dans le rumen une dégradation plus ou moins importante, dont le produit terminal est l'ammoniac (NH_3) : les protéines sont transformées en AA puis subissent une fermentation jusqu'au stade NH_3 , alors que l'azote non protéique est directement transformé en NH_3 . Une faible quantité d'énergie génère cette dégradation.

Les *protéines microbiennes* sont synthétisées par les microorganismes du rumen à partir de l'ammoniac. Cette synthèse nécessite la présence d'une quantité suffisante d'énergie et des matières azotées. La dégradation des glucides via les fermentations microbiennes va fournir cette énergie. En cas d'excès, l'ammoniac excédentaire est absorbé puis transformé en urée dans le foie.

Quel est le devenir de ces protéines microbiennes ? Une partie de la population microbienne (et donc de leurs protéines) est dégradée dans le rumen ; une autre partie reste libre dans le liquide ruminal, et enfin une dernière partie fixées aux particules alimentaires quitte le rumen et passe dans la caillette, où elle subit une digestion enzymatique, conduisant à la formation d'acides aminés (AA) (Figure 06).

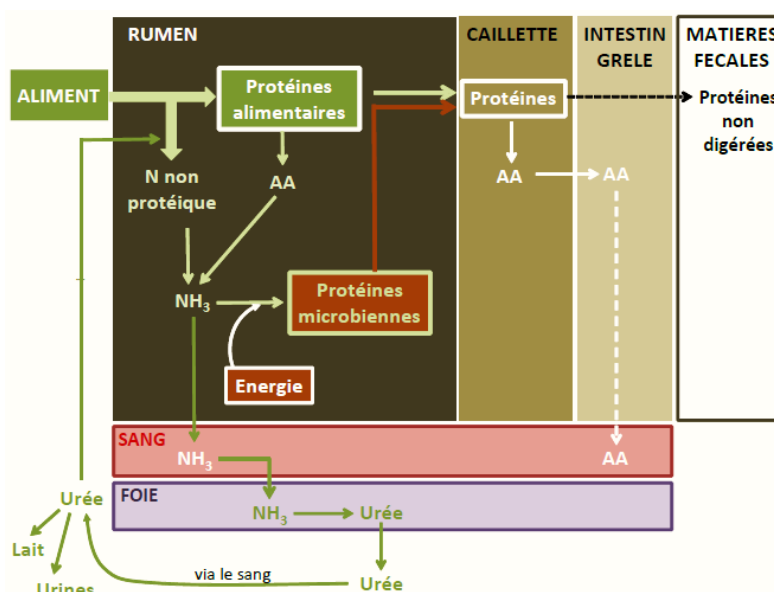


Figure 6 : Schéma de la digestion des matières azotées chez le ruminant (Cuvelier et *al.*, 2021).

2.2. Actions digestives chez la poule

L'aliment est ingéré par la bouche (bec, langue) sans subir de mastication. Le suc salivaire riche en mucus lubrifie le bol alimentaire facilitant ainsi son passage dans l'œsophage. Chez les oiseaux, le jabot (poche extensible de l'œsophage) permet la régulation du transit. Le proventricule et le gésier jouent respectivement les rôles complémentaires de l'estomac chimique et de l'estomac mécanique. Les sécrétions acides du proventricule permettent la solubilisation du carbonate de calcium qui intervient par exemple dans la formation de la coquille. Le chyme est puissamment broyé dans le gésier dont les parois rugueuses sont entourées de muscles. Ce broyage est d'autant plus efficace que l'animal aura ingéré du grit résistant aux sécrétions du proventricule. La pepsine sécrétée dans le proventricule conduit à l'hydrolyse des protéines dans le gésier. La solubilisation des nutriments se poursuit le long de l'intestin grêle sous l'action des sucs pancréatiques et biliaires. Le chyme est ensuite temporairement stocké dans les cæca, des poches allongées contenant des bactéries fermentaires qui permettent une dernière digestion et absorption des nutriments avant d'atteindre le colon. Les voies digestives et urinaires convergent au niveau du cloaque par lequel sont expulsés ensemble urines et excréments. L'eau et les électrolytes de l'urine peuvent être réabsorbés au niveau des caeca. L'urine alors concentrée en urates prend un aspect blanc et pâteux.

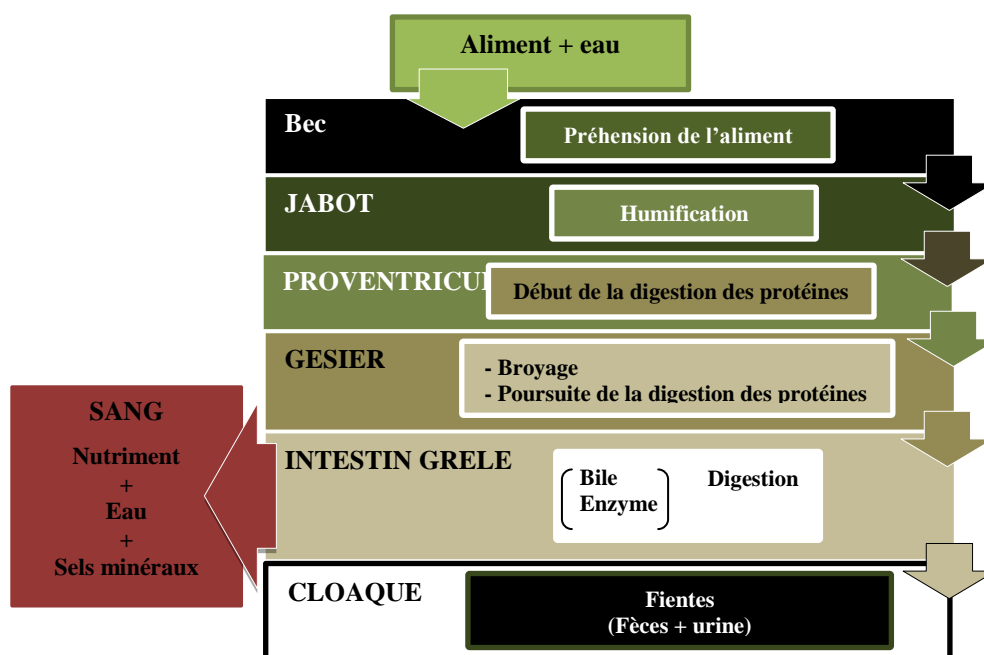


Figure 07 : Représentation schématique de la digestion chez le poulet (Surdeau et Henaff, 1979 in Dusart., 2015 [ITAVI])

2.3. Actions digestives chez le lapin

Les particules alimentaires consommées par le lapin arrivent rapidement dans l'estomac. Elles y séjournent dans ce milieu très acide 3 à 6 heures et y subissent peu de transformations chimiques (solubilisation d'un nombre de particules et début d'hydrolyse des protéines). Dès l'entrée dans l'intestin grêle, le contenu est dilué par l'afflux de bile, par les premières sécrétions intestinales et par

le suc pancréatique. Sous l'action des enzymes contenues dans ces sécrétions, les éléments aisément dégradables sont absorbés par la paroi de l'intestin. Les particules non dégradées entrent dans le cæcum et subissent une attaque par les enzymes des bactéries cæcales. Les éléments dégradables (AGV principalement) sont libérés et franchissent à leur tour la paroi du tube digestif. Le contenu du cæcum est alors évacué vers le côlon. Il est constitué pour moitié, par des particules alimentaires non dégradées et, pour l'autre moitié, par le corps des bactéries qui se sont développées dans le cæcum.

Jusqu'à ce stade, le fonctionnement du tube digestif du lapin n'est pas réellement différent de celui des autres monogastriques. Par contre, L'originalité est située dans le fonctionnement du côlon proximal. En effet, si le contenu cæcal s'engage dans le côlon au cours de la matinée, la paroi colique sécrète un mucus qui enrobe progressivement les boules du contenu. On les nomme crottes molles ou "cæcotrophes". L'animal récupère ces crottes molles par aspiration dès qu'elles sortent de l'anus, puis il les avale sans les mâcher. En fin de matinée, dans l'estomac, le contenu des cæcotrophes suit une digestion identique à celle des aliments normaux. Ces cæcotrophes représentent un apport appréciable de protéines de bonne valeur biologique et de vitamines hydrosolubles.

Si, par contre, le contenu cæcal s'engage dans le côlon à un autre moment dans la journée, son sort est différent. On observe alors des successions de contractions de sens alterné avec des différences de puissance et de vitesse de déplacement. Le contenu est en quelque sorte essoré comme une éponge que l'on presse. La fraction liquide, contenant les produits solubles et les petites particules (moins de 0,1mm), est en grande partie refoulée vers le cæcum, tandis que la fraction solide, renfermant surtout les grosses particules (plus de 0,3mm), forme les crottes dures qui seront évacuées dans les litières.

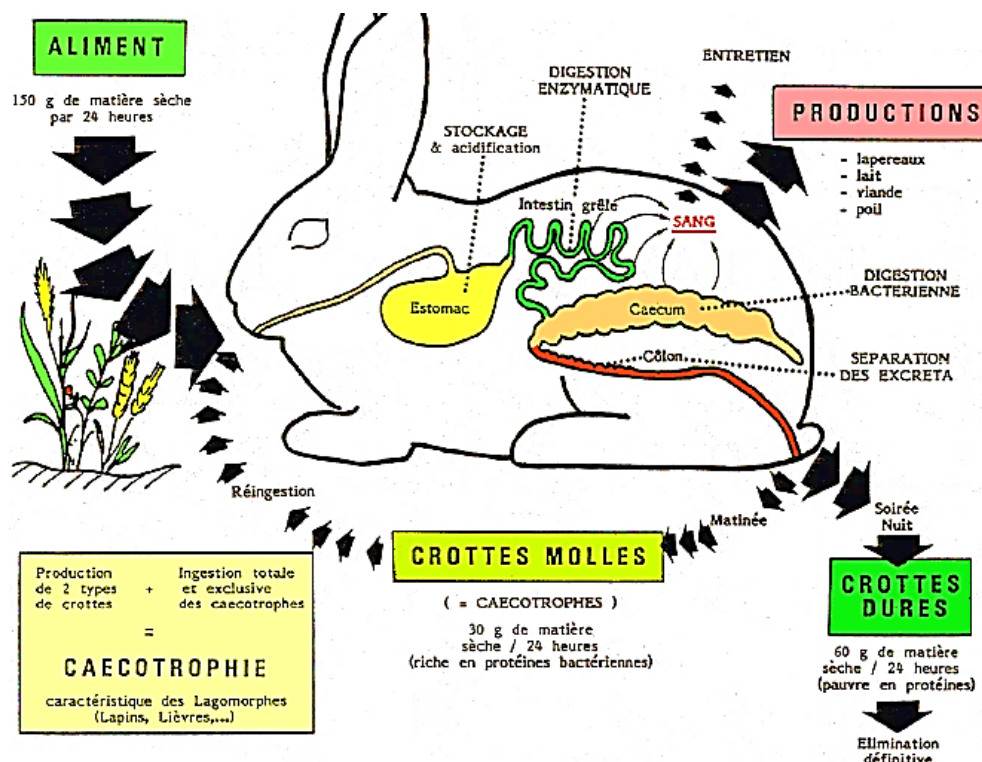


Figure 8 : La digestion chez le lapin (Lebas., 2008).

3. Alimentation énergétique

3.1. Importance de l'alimentation énergétique chez l'animal

L'énergie se définit comme "*la capacité d'un corps à produire un travail*". Chez les animaux, elle se présente principalement sous les formes chimique, mécanique, électrique et thermique. Contrairement aux végétaux, les animaux ne peuvent tirer directement leur énergie du soleil ; ils doivent donc en recevoir un apport constant dans leur alimentation. C'est pour eux la seule manière d'en capter des quantités suffisantes. Les nutriments contenus dans les aliments, qui procurent de l'énergie sont les hydrates de carbone (glucides), les protides et les lipides.

Le métabolisme assure l'énergie disponible pour l'entretien des fonctions essentielles du corps (respiration, circulation du sang, etc.). Une partie de l'énergie des aliments est convertie en d'autres formes de produits chimiques (croissance corporelle, lait, œufs, etc.) et mécaniques (perdue sous forme de chaleur), mais une partie est renvoyée dans l'environnement sous forme de chaleur ou d'énergie chimique résiduelle des excréments.

La première loi de la thermodynamique (loi de conservation de l'énergie), précise que *«toute énergie qui disparaît sous une forme apparaît en quantité équivalente sous une autre»*. Dans la nutrition animale, cela signifie que, si un animal reçoit une certaine quantité d'énergie dans les aliments, nous devons pouvoir la retrouver entièrement sous une forme ou l'autre. L'énergie qui lui est donnée est soit excrétée, soit transformée en chaleur, soit utilisée pour effectuer un travail, soit encore retenue par l'organisme sous l'une ou l'autre forme. En d'autres termes, *«tout ce qui rentre doit sortir»*.

3.2. Besoins alimentaires

Les besoins énergétiques correspondent aux dépenses physiologiques de l'animal pour son entretien et ses productions. Ces dépenses sont couvertes grâce à l'apport d'énergie contenue dans la matière organique des aliments ingérés. Trois types de dépenses énergétiques sont à distinguer :

- la dépense énergétique d'entretien
- la dépense énergétique de production
- et la dépense énergétique nécessaire à l'utilisation des aliments et des nutriments, libérée sous forme d'extra-chaleur.

3.2.1. La dépense d'entretien

La dépense d'entretien comprend l'énergie dépensée par le métabolisme de base et l'énergie nécessaire au maintien du poids de l'animal dans les conditions normales.

3.2.1.1. Le métabolisme de base (MB)

Le métabolisme de base (MB) est la dépense énergétique minimale par 24h, qui permet l'intégrité de l'organisme. Cette dépense est liée pour 50 à 60% aux grandes fonctions vitales (respiration,

circulation, excrétion, sécrétion) et liée pour 40 à 50% au renouvellement constant des constituants tissulaires et au maintien de la constante chimique intracellulaire.

La dépense du métabolisme de base s'expriment par rapport au poids métabolique ($PV^{0,75}$). Lors de sa mesure, l'animal doit être (obligatoirement) à jeûne (post-absorption), au repos, non endormi, en relaxation physique et mentale et placé à une température correspondant à la zone de neutralité thermique.

3.2.1.2. Facteur de variation du métabolisme de base (MB)

- ✓ **La température** : C'est à neutralité thermique que les pertes énergétiques sont minimales.

Tableau 03 : Zone de neutralité thermique de différentes catégories d'animaux (en °C) (Drogoul et al., 2004).

Catégorie d'animaux	Zone de neutralité thermique	Catégorie d'animaux	Zone de neutralité thermique
Bovins et chevaux	5 à 20	Poussins d'un jour	32
Chèvres	10 à 20	Poulettes de 6 semaines	21
Veaux	5 à 15	Poules pondeuses	15 à 20
Volailles	15 à 25	Lapins	15 à 18

- ✓ **Le sexe** : le métabolisme de base est important chez le mâle que chez la femelle.

Pour les bovins, le MB chez le mâle est supérieur de 10% que chez la femelle. Chez les ovins de 5%.

- ✓ **L'espèce et la race** : les oiseaux ont un MB supérieur à celui des mammifères. Chez les races laitières le MB est supérieur de 13% à celui des races à viande.
- ✓ **L'âge** : le MB des jeunes > à celui des adultes.
- ✓ **Le Rythme nycthéméral** (variation du jour et de la nuit) : le MB de jour > MB de la nuit
- ✓ **Le Poids** = le MB varie en fonction de Poids métabolique ($P^{0,75}$).

- chez les mammifères : **KLEIBER (1931)** : $MB = 72 \times P^{0,75}$

BRODY (1932) : $MB = 70,5 \times P^{0,75}$ (la plus utilisées.)

- Chez les homéothermes, la constante est de 70

- Chez les Poikilothermes, la constante est de 2

- Chez les oiseaux : **CALDER et KING (1974)**: $MB = 78. P^{0,72}$

FARRELL (1986): $MB = 97. P^{0,60}$

- ✓ **Niveau alimentaire (NA)** = Le MB augmente lorsque le niveau alimentaire augmente.

3.2.1.3. La dépense énergétique d'entretien

Dans les conditions d'élevage habituelles, un animal n'est jamais placé dans des conditions optimales pour mesurer son métabolisme de base, car il est soumis à une activité physique et à des conditions climatiques parfois différentes de sa zone de neutralité thermique. La dépense énergétique d'entretien correspond à la production de chaleur d'un animal non productif à jeûne. Elle inclut l'énergie du métabolisme de base et celle nécessaire pour maintenir l'animal dans ses conditions de vie normales.

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

La dépense énergétique est supérieure à l'entretien par rapport au métabolisme de base. Chez les ruminants, les besoins d'entretien sont équivalents à : 107-110% de MB (stabilisation entravée).

130% de MB (Pâturage) ;

160% de MB (Chèvre en zone de montagne)

Chez les bovins, les besoins énergétiques d'entretien sont calculés par la formule suivante :

$$BEe = 1,5 + \frac{PV}{200} \quad UF$$

Avec : BEe = Besoins énergétiques d'entretien

PV = Poids vif

UF = Unité Fourragère

En stabulation entravée, si le PV = 600 kg, les BEe = 4,5 UF

3.2.2. Besoins énergétiques de production

Les dépenses de production s'ajoutent à celles de l'entretien, il y'a autant de besoins de production comme il y'a des catégories d'animaux et de production) : lait, viande, œufs, laine, gestation,).

a. Croissance

La dépense de croissance correspond à l'énergie des protéines et des lipides fixés (les réserves glucidiques corporelles sont faibles). La fixation énergétique dépend de la vitesse de croissance et de la composition chimique du croît.

La quantité d'énergie fixée varie également avec le sexe, l'âge, le type génétique, le poids et le niveau alimentaire (tableau 04).

Tableau 04 : Quantité d'énergie fixée dans le croît de bovins de race, sexe et poids différents (Kcal/kg de croît de la masse corporelle) (INRA., 1988).

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

b. Production laitière (lactation) :

La dépense de lactation dépend de la quantité et de la composition du lait produit. Pour synthétiser 1L de lait, la mamelle d'une vache filtre environ 500 L de sang (le pouvoir calorifique est de 940 kcal, alors 1 L de lait donne 740 kcal → le rendement est de près de 80%). La dépense occasionnée par la production d'un Kg de lait peut être calculée à partir de sa composition chimique (tableau 05).

Tableau 05 : Composition moyenne d'un Kg de lait de différentes espèces (Drogoul et *al.*, 2004).

	MG (g)	Protéines (g)	Lactose (g)	Energie (Kcal)
Lait de vache	40	31	48	740
Lait de chèvre	32	30	43	670
Lait de brebis	63	56	44	1080
Lait de jument	12	19	62	470
Lait de lapine	120	160	20	2250

c. 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. Dès la fixation de l'embryon sur la paroi de l'utérus (au 11^{ème} jour après l'œstrus chez la brebis, et 22^{ème} jour chez la vache), l'embryon reçoit des quantités de plus en plus importantes du sang qui véhicule les nutriments permettant son développement ; on estime qu'au dernier 1/3 de la gestation, les dépenses énergétiques représentent environ 40% de celle des besoins totaux.

Sur le terrain, on pratique "le Steaming" 3 semaines avant la mise-bas et 2 semaines après celle-ci.

d. Production de la laine : la dépense énergétique est faible et varie avec la race :

Merinos : 10 kg/an → 27 g/j → 205 kcal/j ≈ 17%

Ile de France : 4 kg/an → 11 g/j → 82 kcal/j ≈ 7% BE

Ouled Djellal : 1.5 kg/an → 4 g/j → 30 kcal/j ≈ 3% BE

e. Production des œufs:

Si on considère un œuf moyen de 62 g :

- Vitellus (jaune) : les lipides (54,6 kcal) + protéines (17,7 kcal)
- Albumen (blanc) : protéines (22,3 kcal).

Un œuf de 62 g → 94,6 kcal → 1g d'œuf = 1,53 kcal

Plusieurs modèles de calcul des besoins énergétiques journaliers de la ponte ont été établis :

➤ Équation de Grimbergen (1974) :

$$EMi_{\text{kcal}} = 135 \times P^{0,75} + 1,68 E_e + 1,20 E_{\Delta P}$$

E_e = Énergie contenue dans l'œuf.

$E_{\Delta P}$ = Énergie contenue dans le gain du poids (kg)

➤ Leclercq (1985) : à (+ 20°C)

$$EMi = 75,8 \times P + 5,49 \Delta P + 2,35 e$$

P = poids vif

ΔP = gains de poids

e = poids de l'œuf exporté / j

Les principaux facteurs de variation des besoins énergétiques (BE) de cette production sont : l'intensité de ponte, la taille de l'œuf et sa composition.

f. Production de chair :

L'approche expérimentale retenue par de nombreux auteurs ne prend en considération que la synthèse des protéines et celle des lipides. La synthèse du glycogène est trop faible pour être comptabilisée. Diverses équations en ont été proposées pour prédire le besoin énergétique du poulet en croissance. Elles peuvent être résumées par la formule suivante :

$$\text{EM kcal/j} = [105 + 4,6 (25 - T)] \times \text{Pm}^{0,75} + 10,4 \text{ L} + 14 \times \text{Pr} \quad (\text{Larbier et Leclercq., 1992})$$

T°C : < 25°C

Pm : Poids moyen (kg)

L(g) : lipides de la carcasse

Pr (g) : protéines de la carcasse.

g. Production de travail :

Tout travail musculaire provoque une augmentation de la consommation d'oxygène par rapport à celle enregistrée chez l'animal en repos. L'élévation de la consommation d'oxygène reflète l'intensité du travail fourni et permet de quantifier la dépense calorifique consécutive au travail.

Les facteurs de variation de ces besoins énergétiques sont liés aux :

- poids de l'animal
- Poids de la charge
- Vitesse de déplacement
- Relief (pente)
- L'intensité de travail

Exemple : un bovin de 450 kg qui exerce une forte activité physique de type traction de 63 kg à 2,5 km/h pendant 6 h, l'apport énergétique est de 8,1 UF.

3.3. Transformation et utilisation de l'énergie alimentaire chez l'animal

L'énergie apportée par les aliments est utilisable pour une série de fonctions, et se transforme depuis l'ingestion jusqu'à l'utilisation final par l'animal.

3.3.1. Energie brute (EB)

La quantité totale d'énergie contenue dans un aliment est appelée l'énergie brute (EB). Elle varie selon la nature de l'aliment, en fonction des nutriments présents dans celui-ci. Elle correspond à la chaleur dégagée dans une bombe calorimétrique renfermant l'aliment dont on veut évaluer la valeur énergétique. Sachant que :

- la combustion d'1 g de glucides libère 4,7 Kcal ;
- la combustion d'1 g de lipides libère 9,3 Kcal ;
- et la combustion d'1 g de protides libère 5,6 Kcal.

L'analyse alimentaire permet de calculer l'énergie brute sans placer l'aliment dans la bombe calorimétrique.

L'EB n'est jamais valorisée complètement par l'animal (figure 09).

3.3.2. Energie digestible (ED)

Selon la digestibilité de la ration, une fraction plus ou moins importante de l'EB est perdue dans les matières fécales. L'énergie résiduelle s'appelle l'énergie digestible (ED). Celle-ci correspond alors à l'énergie brute diminuée de l'énergie contenue dans les fèces. La connaissance de la digestibilité de l'énergie (dE) permet de calculer l'énergie digestive : $ED = EB \times dE$

3.3.3. Energie métabolisable (EM)

L'énergie métabolisable correspond à la différence entre l'énergie digestible et l'énergie perdue sous forme de gaz de fermentation (CO_2 , $CH_4 \approx 4$ à 10% de l'EB pour les ruminants) à laquelle s'ajoute l'énergie de l'urine (2 à 5% de l'EB). La production de méthane est corrélée avec la teneur en parois. L'énergie urinaire est en relation avec la richesse du régime en matières azotées.

Le rapport $q = \frac{EM}{EB}$ évalue le rendement de la transformation de l'EB en EM.

Actuellement, les systèmes d'évaluation de la valeur énergétique des aliments destinés aux volailles sont basés sur l'énergie métabolisables (urine et fèces ne sont pas séparées lors de l'excrétion).

3.3.4. Energie 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 d'extra-chaleur :

$$EN = EM - \text{Extra-chaleur}$$

Le rapport $k = \frac{EN}{EM}$ évalue le rendement de la transformation de l'énergie métabolisable (EM) en énergie nette (EN). Chez les ruminants, trois (03) rendements k ont été définis en fonction de l'utilisation de l'énergie par l'animal :

- km pour l'entretien (*maintenance*),
- kl pour la lactation,
- et kf pour la croissance (*fat*).

Deux facteurs jouent un rôle important sur la variation du rendement k : la demande en nutriments qui dépend de la fonction physiologique, et l'offre liée aux caractéristiques de la ration.

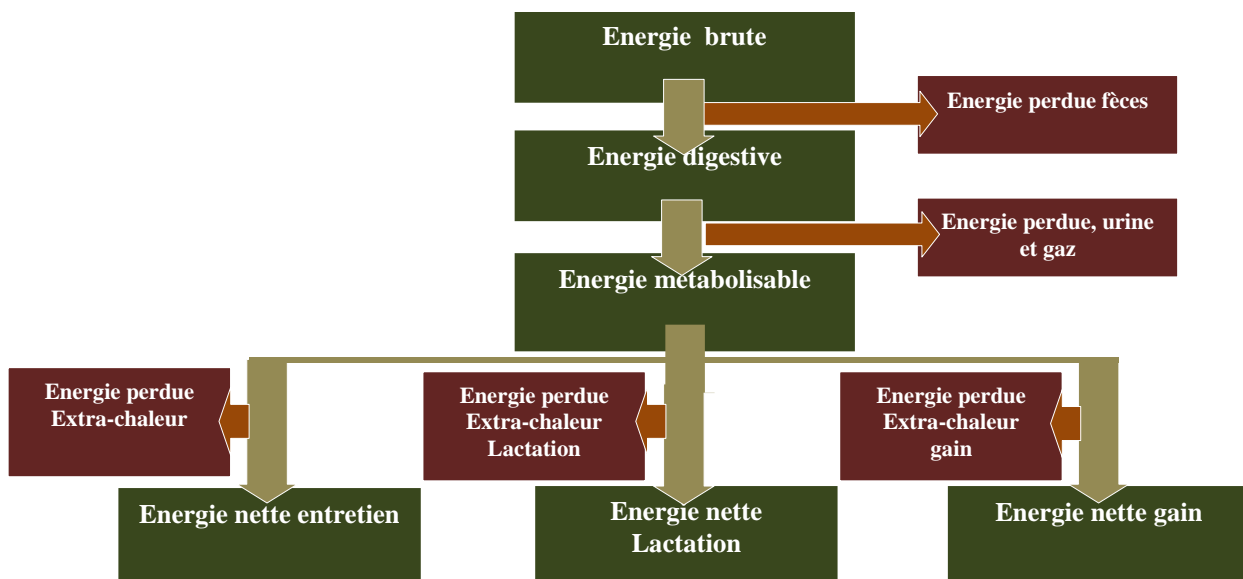


Figure 09 : Schéma général d'utilisation de l'énergie par les ruminants (Alimentation des Ruminants, INRA, 1978). E : énergie

3.4. Les système d'expression de l'énergie

3.4.1. Les système basés sur l'ED, l'EM et l'EN

La valeur énergétique des aliments distribués et les besoins des animaux doivent être exprimés dans le même système d'unité (ED, EM ou EN). Le système fondé sur l'énergie nette (EN) est préférable car il tient compte de toutes les catégories de pertes intervenant entre l'ingestion et l'utilisation par la cellule. La principale difficulté de ce système est l'estimation du rendement k d'utilisation de l'énergie métabolisable en énergie nette en raison des variations de ce rendement (k) avec les caractéristiques de la ration et les fonctions physiologiques et sa dépendance de l'importance relative de l'entretien et de la production.

En pratique, on peut distinguer :

- Les animaux qui reçoivent des aliments de nature et de composition très différentes (fourrages, concentrés), conduisant 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 organiques (EF, EG, EU) et d'extra-chaleur moins variables ; on utilise alors des systèmes fondés sur l'énergie métabolisable ou l'énergie digestible. C'est le cas des volailles pour lesquels on adopte l'énergie métabolisable et des lapins pour lesquels on retient l'énergie digestibles.

3.4.2. Système d'unités d'évaluation de l'apport énergétiques des ruminants

La valeur énergétique d'un aliment est la quantité d'énergie d'un Kg de cet aliment qui contribue à couvrir les dépenses d'entretien et de production des animaux. Normalement cette valeur est exprimée en *Kilocalories* / Kg d'aliment mais par commodité et depuis très longtemps, elle est rapportée à 1 Kg d'orge à 87 % de MS et exprimée en unité fourragère (UF).

1 Kg d'orge à 87% de MS = 1 UF

L'efficacité énergétique des aliments est différente pour produire du lait ou de la viande. Donc ce système retient deux unités :

- Unité Fourragère Lait (UFL) ;
- Unité Fourragère Viande (UFV).

1 Kg d'orge = 1 UFL = 1700 Kcal ou 7106 kj.

1 Kg d'orge = 1 UFV = 1820 Kcal ou 7608 kj.

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

Le système UFV est utilisé pour les bovins, les agneaux et les chevreaux ayant une croissance élevée (correspondant à 1 GMQ > 1000g pour les bovins)

3.5. Effets de carence ou excès nutritionnels

Une alimentation énergétique déficiente ou excessive, affecte les animaux de différentes manières, impactant leur santé, leur production et leur reproduction. Elle peut entraîner une croissance ralentie, une vulnérabilité aux maladies, une reproduction compromise, une baisse de la production (lait, viande, œufs,...) et des déséquilibres métaboliques.

3.5.1. Effets sur le nouveau-né

Le déficit énergétique de la vache a un effet sur la croissance du veau. Le poids du veau à la naissance est plus faible, ainsi que la production laitière. Il en résulte une diminution du poids au sevrage et de la viabilité du veau lors de restriction alimentaire sévère (Petit et Agabriel, 1993).

3.5.2. Effets sur la croissance et le développement

Lors du sevrage chez les ruminants, une sous-alimentation peut entraîner un retard du développement de la panse et du rumen et des problèmes de digestion ce qui provoque, par la suite, un ralentissement de la courbe de croissance et une taille réduite.

Aussi, chez les jeunes, un déficit énergétique ralentit la croissance en affectant le développement musculaire et osseux, ce qui peut compromettre leur potentiel de production ultérieur.

3.5.3. Effets sur les réserves corporelles

Les apports énergétiques insuffisants entraînent la mobilisation des réserves corporelles, principalement sous forme de graisses et de tissus musculaires, pour couvrir les besoins métaboliques. Chez les vaches laitières, par exemple, un déficit énergétique prononcé peut conduire à une perte de poids significative, jusqu'à plus de 40 kg de réserves adipeuses en début de lactation avec une chute de la note de l'état corporel.

Cette mobilisation excessive des graisses peut entraîner des troubles métaboliques tels que la cétose, caractérisée par une accumulation de corps cétoniques dans le sang, résultant d'une dégradation accrue des acides gras non estérifiés (AGNE).

À l'inverse, un apport énergétique excessif entraîne un stockage accru des graisses corporelles, favorise l'accumulation de lipides intramusculaires et peut altérer la qualité de la viande.

3.5.4. Effets sur la reproduction

L'alimentation agit sur la reproduction à toutes ses étapes et ses composantes chez les femelles (puberté, chaleurs, saillie, gestation, tarissement, post-partum et lactation) et chez les mâles (puberté, libido et sperme). Il en résulte une influence sur la production numérique du troupeau.

Le déficit énergétique peut entraîner :

- un allongement de l'œstrus postpartum, retard de l'ovulation, chaleurs silencieuses et par conséquent allongement de l'intervalle entre vêlage suite aux perturbations hormonales ;
- des mortalités embryonnaires accrues suite à la faible progestéronémie ;
- une qualité ovocytaire et un développement embryonnaire affectés suite aux pertes de poids corporel et augmentations des AG libres dans le sang ;

Quant à l'excès en énergie, il peut également nuire à la reproduction :

- Perturbation de l'équilibre hormonal, réduction de la qualité ovocytaire et de la fertilité dues à l'accumulation des graisses dans les tissus mammaires, le foie et les organes reproducteurs ;
- Rallongement de l'intervalle entre les vêlages et diminution du taux de conception : les femelles en surpoids mettent plus de temps à reprendre leurs cycles reproductifs après la mise bas.
- Problèmes embryonnaires avec moins de divisions cellulaires.

Chez le mâle :

- Retard de puberté, réduction de la taille des testicules et de la concentration spermatique affectant ainsi la fertilité à long terme.
- Diminution de la libido et de la motivation sexuelle, ce qui peut entraîner une baisse des performances reproductives.

3.5.5. Effets sur la production

Le déficit énergétique peut conduire à une baisse des productions (lait et viande chez les mammifères et nombre d'œufs pondus chez les volailles) et peut également affecter la qualité des produits.

3.5.6. Maladies métaboliques

La Cétose (acétonémie)

La cétose survient généralement durant la phase de démarrage de la lactation suite à un bilan énergétique négatif. Elle se traduit par une augmentation de la concentration en corps cétoniques dans le sang, dans les urines et dans le lait. Les conséquences seront une baisse de la production laitière, une perte de poids et un affaiblissement du système immunitaire.

L'acidose ruminale alimentaire

Un excès en énergie sous forme de céréales ou d'aliments riches en amidon et pauvres en fibres provoque une inflammation du rumen suite à une forte acidité générée par la dégradation rapide des glucides fermentescibles par les bactéries du rumen produisant des AGV et des acides lactiques.

La stéatose hépatique

Une suralimentation de la vache tarie et une sous-alimentation ou une baisse de l'appétit en début de lactation peut provoquer la stéatose qui est une accumulation anormale des graisses dans le foie, résultant de la synthèse hépatique des triglycérides, conséquence d'une augmentation des acides gras libres circulant dans le sang, eux-mêmes provenant de l'utilisation des graisses de réserves.

4. Alimentation azotée

4.1. Importance de l'alimentation azotée

Les Matières azotées sont des éléments plastiques ayant pour rôle principal la synthèse des protéines (de l'organisme, des productions et fonctionnelles : enzymes, hormones...). Un rôle annexe est la fourniture d'énergie (oxydation), lorsque les acides aminés absorbés dépassent les possibilités de synthèse protéique par l'organisme.

Les acides aminés sont les résultats de la digestion des protéines à partir desquels les protéines animales sont synthétisées.

Chez les bovins, les matières azotées représentent 10 à 20% du PV et environ 21% de la masse corporelle délipidée. 50% des protéines de l'organisme sont fixées dans le muscle, 30% dans le conjonctif et la peau.

L'intérêt nutritionnel des matières azotées est lié :

- au rôle constitutif qu'elles jouent dans les tissus,
- à la croissance musculaire chez les jeunes,
- à leur importance sur le plan fonctionnel (enzymes, hémoglobine, ADN, ARN,... etc.),
- à la capacité à alimenter le cycle de Krebs et la néoglucogénèse,
- à l'amélioration de l'appétit et par conséquent de l'ingestion des aliments par l'animal,
- aux produits animaux (lait chez les ruminants et œufs chez les oiseaux).

L'intérêt environnemental crucial d'une alimentation azotée conduite avec de bonnes pratiques est :

- de réduire les rejets d'azote dans l'environnement,
- de minimiser le niveau de la pollution, de l'eutrophisation et des émissions à effet de serre,
- et par conséquent, d'atténuer leur impact sur la qualité de l'eau, de l'air, du sol et du climat,
- aussi bien que de réduire les pertes de la biodiversité.

L'intérêt économique est également important. La maîtrise de l'alimentation azotée permet

- une meilleure conversion alimentaire (plus de viande ou de lait par kg d'aliment),
- un rendement économique élevé,
- une réduction des avec moins d'azote excrété inutilement,
- une diminution des coûts de revient,
- et donc une meilleure rentabilité de l'élevage.

4.2. Besoins alimentaires en matières azotées

Les protéines synthétisées à partir des acides aminés tirés de la digestion des aliments azotés ont de multiples destinations :

- Certain renouvellent ou réparent les cellules de l'organisme dont l'usure est permanente, assurent la synthèse des hormones, des anticorps et enzyme (diastase) ; elle couvre les besoins azotés d'entretien.
- D'autre assurent la multiplication et la croissance de nouvelles cellules, elles représentent les besoin azotés de croissance.
- Une autre partie permet les mécanismes de reproduction et assure le développement du fœtus, elle satisfait les besoins azotés de reproduction et de gestation.
- Enfin, d'autres sont employés à la synthèse des productions riches en protéines : le lait, les œufs, la laine. Elles s'expriment en besoins azotés de production.

4.2.1. Considérations qualitatives des besoins en matières azotées

On classe les vingt-deux acides aminés selon la faculté (plus ou moins grande) de l'organisme de les remplacer lorsqu'ils manquent dans les aliments : les acides aminés indispensables ou essentiels et les acides aminés interchangeableables ou banals.

Les acides aminés indispensables sont ceux que l'organisme animal ne peut pas produire lui-même. Ils doivent obligatoirement se trouver dans la ration. Il s'agit de dix acides aminés : arginine, histidine, isoleucine, leucine, méthionine, phénylalanine, tryptophane, valine, lysine et thréonine.

Les acides aminés interchangeableables sont ceux dont la synthèse est facile par l'organisme. Ils peuvent être élaborés aisément à partir d'acides aminés voisins

En effet, il existe des différences entre les monogastriques et les ruminants dans l'utilisation digestive des matières azotées et par conséquent, les approches sont différentes pour estimer l'apport en azote chez ces derniers.

Les monogastriques exigent tous les acides aminés indispensables et la plupart des autres. Chez la volaille et le veau non ruminants par exemple, le rendement de la synthèse des protéines, destinées à la formation des muscles ou des œufs, dépend de la proportion optimale de chacun des acides aminés nécessaires à la synthèse de ces protéines. L'alimentation azotée des monogastriques commence donc par la détermination des proportions de chaque acide aminé nécessaires.

Les ruminants, contrairement aux monogastrique, bénéficient de la protéogénèse microbienne dans le rumen grâce à leur microflore, à condition que ces animaux reçoivent la quantité suffisante de matières azotées dans leurs aliments. Les microbes du rumen (bactéries, protozoaires) décomposent

les protéines alimentaires, libérant des acides aminés et de l'ammoniac. Ils utilisent l'ammoniac pour synthétiser leurs propres protéines, riches en acides aminés qui seront ensuite utilisés par l'animal.

4.2.2. Évaluation de la dépense azotée

On considère deux types de dépenses :

→ Renouvellement constant des tissus de l'organisme et les synthèses des substances liées à son fonctionnement : il s'agit des dépenses d'entretien.

→ L'exportation des protéines des produits : gain de poids, fœtus, lait, œufs, ... : dépenses de productions.

En ce qui concerne les dépenses de production, on évalue l'importance globale (quantitative) et la composition en acides aminés (aspects qualitatif).

a. Besoins d'entretien :

Les besoins azotés d'entretien chez les animaux d'élevage correspondent à la quantité d'azote nécessaire pour maintenir les fonctions vitales de l'animal sans qu'il y ait production (viande, lait, croissance, etc.). Ces besoins varient en fonction du poids de l'animal et de ses conditions de vie.

Ils se réfèrent à la dépense endogène spécifique définie comme étant la quantité minimale d'azote nécessaire en 24h pour l'entretien de l'animal (M.B). Cette dépense se fait par les matières azotées fécales métabolique (NFm) et (N_{Um}), ou de matière azotée phanères (laine, sabot, ... etc)

a1. L'NFm : il a comme origine les enzymes digestibles, le mucus les pertes cellulaires de tube digestif et également les microorganismes.

$$\text{NFm} = \text{N endogène} + \text{N microbienne.}$$

a2. L'N_{Um} : il dérive du catabolisme des matières azotées au niveau cellulaire, excrété dans les urines sous différentes les formes suivantes :

Mammifères	→ Urée
Vertèbres aquatiques	→ NH ₃
Insectes	→ acide urique
Oiseaux	→ acide urique

a3. L'N de Phanères : pertes azotées qui se font par la laine, les poils, les ongles, desquamation de la peau, etc. Chez les ruminants, l'azote des Phanères est estimé à 0,02 g / kg de P^{0,75}.

Les besoins azotés d'entretien sont calculés par des formules en fonction du poids de l'animal et de son espèce. Chez les ruminants, les besoins d'entretien sont de :

$$\text{BE}_N = 100 + 0,5 P \quad (\text{g de PDi/j})$$

Chez le poulet en croissance, le besoin minimal en protéines parfaitement équilibrées est de :

$$BPE = 8 \times Prot.max^{-0.27} + Prot \quad (g/j)$$

Prot.max : quantité de protéine corporelle à l'état mature (kg)

Prot : quantité de protéine corporelle de l'animal à l'état considéré

b. Besoins azotés de production :

Ils Correspondent à la quantité d'azote ingérée qui entraîne la rétention maximale dans des conditions satisfaisantes.

X g d'N → maximum de rétention → production.

Ils concernent toute production (viandes, œuf, lait, laine,...) qui entraîne des dépenses spécifiques dont on évalue l'importance globale (quantitative) et la composition en acides aminés (qualitative).

Besoins Azotés pour la croissance des ruminants :

Les besoins de production sont déterminés à partir des quantités de protéines déposées dans les différents tissus (croissance tissulaire) et compartiments corporels (muscles, os, peau, sang, etc.).

Chez les bovins en croissance et à l'engrais, le besoin de production correspondant à la synthèse protéique des tissus dépend du type d'animal (sexe, génotype tardif ou précoce), de son âge et de l'objectif de croissance. Cette fixation de protéines dans le corps est modulée par un rendement d'utilisation des acides aminés (AA) absorbés. Ce rendement varie selon l'âge et le type de l'animal à viande : 64% pour un jeune bovin charolais de 400 kg contre 30% à 750 kg chez le même animal castré.

En fait, on considère pour un gain de poids ; le pourcentage de protéines en moyen est de 17%, et donc il faut apporter 280g PDI / 1Kg de croit.

Les besoins azotés pour la production du lait :

Les besoins protéiques liés à la production de lait (BesPDIPL) sont calculés à partir des protéines sécrétées dans le lait. Le rendement de conversion des protéines métabolisables en protéines sécrétées 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 à 50 g PDI/kg de lait (INRA., 2010).

$$BPL = PL \times \frac{TP}{0,64} \quad g \text{ PDI}$$

Les besoins en protéine du poulet :

Les besoins en protéine et en acides aminés du poulet ont fait l'objet de nombreux travaux. La compilation des principales études fournit les estimations suivantes :

$$\text{Besoins protéiques pour l'entretien} = 8 \times \text{Prot.max}^{-0,27} + \text{Prot} \quad (\text{g/j})$$

Prot.max : quantité de protéine corporelle à l'état mature (kg)

Prot : quantité de protéine corporelle de l'animal à l'état considéré

$$\text{Besoins protéiques pour la croissance} : \text{BNC} = \Delta P \times 1,25 \quad (\text{g/j})$$

ΔP : gain protéique (g)

Il faut multiplier ce chiffre par 1,65 pour obtenir l'équivalent en protéines de régimes à base de maïs ou de tourteaux de soja.

Les besoins en acides aminés et, en particulier, ceux qui sont les premiers limitants (lysine, acides aminés soufrés, thréonine ...) sont plus importants sur le plan nutritionniste chez le poulet en croissance par rapport aux besoins d'entretien (tableau 06).

Tableau 06 : Estimation du besoin du poulet en quelques acides aminés indispensables (Larbier et Leclercq., 1992).

Acide aminé	Entretien (mg/kg PV/j)	Croissance (g/100g de gain de poids)
Lysine	82	1,49
Acides aminés soufrés	60	1,16
Tryptophane	10	0,27
Thréonine	86	0,75
Leucine	93	1,21
Isoleucine	58	0,77
Valine	70	0,95
Histidine	63	0,37
Arginine	50	1,40
Phénylalanine + Tyrosine	370	1,20

Le tableau 07 renferme les besoins en protéines, lysine et acides aminés soufrés en fonction de l'âge.

Tableau 07 : Besoin du poulet de chair en protéines, lysine et acides aminés soufrés selon l'âge (g/100g de gain de poids (Larbier et Leclercq., 1992).

Semaine	Protéines	Lysine	Acides aminés soufrés
1	30	1,54	1,18
2	30,5	1,55	1,18
3	32,2	1,57	1,22
4	35,8	1,59	1,25
5	37,5	1,64	1,30
6	42	1,69	1,38
7	43,2	1,76	1,40
8	44,8	1,80	1,42
9	45,1	1,85	1,44

c. Le système de mesure PDI (Protéines Digestibles dans l'Intestin)

Le système PDI (Protéines Digestibles dans l'Intestin) est un système de mesure pour déterminer la valeur azotée de chaque aliment en termes de quantité d'acides aminés réellement absorbés par l'intestin. Il a été développé par l'INRAE de France pour remplacer l'ancien système MAD (Matières Azotées Digestibles), afin d'améliorer la précision des calculs des besoins des animaux, des apports alimentaires et du rationnement des ruminants.

Il est attribué deux valeurs de PDI à chaque aliment :

PDIN : potentiel PDI permis par l'azote. *Sa teneur est fonction de l'azote dégradable ;*

PDIE : potentiel PDI permis par l'énergie *Sa teneur est fonction de l'énergie fermentescible*

Les PDIN et PDIE sont la somme deux (2) fractions :

- **PDIA** = protéines digestibles d'origine alimentaire (non dégradées dans le rumen) ;
- **PDIM** = protéines digestibles d'origine microbienne (synthétisées dans le rumen)

Les deux facteurs principaux de cette synthèse ruminale sont l'énergie et l'azote dégradable. Chaque aliment est défini par deux valeurs parallèles :

Une valeur qui est fonction de l'énergie fermentescible : PDIME ;

Et une valeur qui est fonction de l'azote dégradable : PDIMN

$$\mathbf{PDIN = PDIA + PDIMN}$$

$$\mathbf{PDIE = PDIA + PDIME}$$

Lors de calcul de la ration, on totalise les PDIN et les PDIE de chaque aliment. C'est le total PDI le plus faible qui est le facteur limitant. Un déficit en PDIN (azote dégradable) dans le rumen entraîne une baisse de l'activité microbienne. Il s'ensuit : une baisse de la digestibilité, une baisse des unités fourragères (UF) et une baisse de la consommation.

Aussi pour une bonne activité microbienne, l'idéal : PDIN = PDIE.

Cependant, le recyclage de l'urée par la salive augmente les PDIN du rumen, ce qui permet un léger déficit en PDIN alimentaires. Chez les petits ruminants, on peut tolérer :

$PDIE - PDIN = 7 \text{ à } 14 \text{ grammes / UF}$ selon que le rapport (PDIE – besoins PDI) est normal ou élevé.

4.3. Effets de carence ou excès nutritionnels

Les aliments destinés aux animaux doivent fournir une quantité suffisante en acides aminés avec un apport équilibré entre azote et énergie. Une carence en matières azotées peut entraîner une perte de poids, une diminution de la croissance, une baisse de la production (lait, viande, œufs) et une

vulnérabilité des animaux. Un excès, quant à lui, peut provoquer une diminution de l'appétit, des problèmes de santé et des problèmes de reproduction.

4.3.1. Effets sur l'ingestion

La faible ingestion provoquée par un manque d'azote dégradable des régimes avait été particulièrement bien étudiée avec des fourrages pauvres en azote et peu digestibles. L'addition de sources d'azote non protéiques (ANP) permet d'observer une augmentation des quantités ingérées. La meilleure disponibilité de l'azote dégradable accroît l'activité cellulolytique et améliore souvent la digestibilité de la ration.

Un excès en azote peut également provoquer une diminution de l'appétit chez l'animal. Cet effet peut avoir lieu en raison de la mauvaise absorption des nutriments, de l'intolérance aux produits de dégradation de l'azote et de la dégradation de la muqueuse digestive.

4.3.2. Effet sur l'activité microbienne chez les ruminants

L'efficacité de la dégradation des particules alimentaires ingérées dépend de l'énergie disponible ainsi que de l'azote dégradable apporté par la ration.

4.3.3. Effets sur le poids

Les animaux peuvent maigrir et perdre du poids en raison de la diminution de la synthèse protéique.

4.3.4. Effets sur la croissance

Une carence en matières azotées entraîne une réduction de la synthèse protéiques des protéines, notamment dans les muscles, ce qui limite la croissance de l'animal.

4.3.5. Effets sur les productions

Une carence en azote entraîne une diminution des quantités et de la qualité des produits (viande, lait et œufs) du fait de la faible exportation des protéines des produits.

4.3.6. Effets sur la reproduction

Chez la vache laitière, le manque de matières azotées en début de gestation favorise la mortalité embryonnaire, alors qu'en fin de gestation, il favorise la rétention placentaire. L'augmentation de la ration en matières azotées, même avec des protéines peu dégradables se traduit souvent par une diminution de la fertilité. Elle s'accompagne d'un niveau élevé d'azote uréique dans le plasma sanguin qui agit sur la fertilité même si l'excès est de courte durée. Cet excès est nuisible aussi à la maturation des oocytes et au développement des embryons (Meyer, 2009).

4.3.7. Effets sur la santé

Une carence en azote peut provoquer une faiblesse générale de l'animal, une fatigue et une vulnérabilité aux maladies.

Un excès en azote peut provoquer le risque d'intoxication par l'ammoniac, perturber le fonctionnement du rumen, et causer des problèmes digestifs (diarrhée, ballonnements et acidose ruminale), et hépatiques et rénaux (excès d'urée).

4.3.8. Effets sur l'environnement

L'azote dégradable en excès dans le rumen et les acides aminés en excès ou en déséquilibre dans l'organisme, sont catabolisés en urée et excrétés. Ainsi, l'urée peut représenter moins de 10% de l'azote urinaire pour des régimes pauvres en azote dégradable. A l'inverse, elle peut représenter plus de 80% de l'azote total pour des régimes très excédentaires ou des animaux fortement suralimentés.

Ces rejets azotés élevés (urée, ammoniac) provoquent la pollution de l'air, des sols et de l'eau en augmentant ainsi la charge polluante et les coûts des élevages.

5. Alimentation minérale et vitaminique

5.1. Importance de l'alimentation minérale et vitaminique

Les minéraux sont des constituants importants des tissus (ex : tissu osseux = 26% de minéraux) et des produits animaux (ex : calcium dans la coquille de l'œuf et dans le lait). Ils participent à la régulation des fonctions de l'organisme :

- régulation de la pression osmotique du sang (Na^+ et K^+) ;
- perméabilité cellulaire (Ca^{++} et Mg^{++}) ;
- excitabilité neuromusculaire (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++}) ;
- transport de l'énergie par les molécules phosphorylées,
- métabolisme des glucides impliquant le passage par des formes phosphorylées,
- métabolisme des lipides (soufre) ;
- transport de l'oxygène (fer) ;
- acidification du milieu gastrique.

On distingue les macroéléments représentant 99 % des minéraux (Ca, P, Mg, ...) et les oligo-éléments présents en très faibles quantités (Fr, Cu, Mn, Zn, ...). Une carence ou un excès en minéraux peut se traduire par une baisse des performances de l'animal (croissance, production, reproduction) ou par des troubles sanitaires (anémie, boiteries, troubles du pelage, ...).

Les vitamines, bien que présentes en très faible quantité dans l'organisme permettent le déroulement de nombreuses activités enzymatiques indispensables à la vie. Les vitamines les plus fréquemment apportées aux animaux sont les vitamines A, D et E. Comme pour les minéraux, une carence en vitamines entraîne une baisse des performances et si elle est sévère, des troubles sanitaires graves.

Les rations à base de fourrages conservés et de concentrés ne sont généralement pas suffisamment riches en minéraux et vitamines pour couvrir les besoins des animaux. Il est alors nécessaire de leur apporter un CMV pour couvrir leurs besoins. Celui-ci représente une faible part de l'alimentation des animaux (environ 2 %) mais essentiel au bon fonctionnement de leur organisme. Les CMV se présentent généralement sous forme de poudres ou semoulettes à incorporer à l'aliment.

Pour les animaux qui pâturent, il n'y a généralement pas besoin d'apporter de CMV sauf si les sols sont carencés en minéraux (manganèse, cobalt, sélénium,...). A l'herbe, le CMV peut être sous forme de pierres à lécher, mais il s'agit bien souvent d'un apport de sels pour stimuler l'appétit.

5.2. Besoins alimentaires en minéraux et en vitamines

5.2.1. Besoins en minéraux et vitamines chez les ruminants

5.2.1.1. Les éléments minéraux majeurs

a. Besoins d'entretien en éléments minéraux majeurs

Les bases de calcul de la prévision du besoin d'entretien pour les différents éléments minéraux majeurs sont présentées au tableau 08.

Le besoin d'entretien est généralement assimilé aux pertes fécales d'origine endogène augmentées des pertes urinaires obligatoires. Pour le phosphore (P) et le calcium (Ca), ce besoin se calcule à partir de la Matière Sèche Ingérée (MSI) et du poids vif.

Tableau 08 : Prévision du besoin d'entretien en éléments minéraux majeurs absorbés (en g/j) (Meschy, 2007).

Catégories d'animaux	Phosphore	Calcium	Magnésium	Sodium	Chlore	Potassium
Bovins						
Croissance		0,663 MSI + 0,008PV		0,015PV	0,23PV	0,105PV
Gestation	0,83MSI +	0,015PV	0,007PV	0,015PV	0,023PV	0,105PV
Lactation	0,002PV	0,663 MSI + 0,008PV		0,023PV	0,035PV	0,150PV
Caprins						
Croissance		0,67 MSI + 0,01PV		0,015PV	0,23PV	0,105PV
Gestation	0,905MSI + 0,3	0,015PV	0,01PV	0,015PV	0,023PV	0,105PV
Lactation	+ 0,002PV	0,67 MSI + 0,01PV		0,023PV	0,035PV	0,150PV
Ovins						
Croissance		0,67 MSI + 0,01PV		0,015PV	0,23PV	0,105PV
Gestation	0,905MSI + 0,3	0,015PV	0,01PV	0,015PV	0,023PV	0,105PV
Lactation	+ 0,002PV	0,67 MSI + 0,01PV		0,023PV	0,035PV	0,150PV

PV : poids vif en kg.

MSI : matière sèche ingérée en kg/j.

b. Besoins de production en éléments minéraux majeurs

Le besoin de croissance (tableau 09) correspond à la minéralisation du dépôt corporel, le plus souvent squelettique ; en raison de la nature du croît (os, muscle et tissus adipeux) il diminue avec l'âge des animaux.

Le besoin de gestation (tableau 09) correspond à la minéralisation de l'utérus gravide ; il ne devient significatif que lors du dernier tiers de la gestation et concerne principalement Ca et P.

Le besoin de lactation est directement déduit de la composition minérale du lait.

Tableau 09 : Prévision des besoins de production en éléments minéraux majeurs absorbés (en g/j.)
(Meschy, 2007).

	Phosphore	Calcium	Magnésium	Sodium	Chlore	Potassium
Croissance(par kg de gain)						
Bovins	$1,2 + 4,66PVad^{0,22} \times PV^{-0,22}$	$9,83PVad^{0,22} \times PV^{-0,22}$	0,40	1,40	1,00	1,60
Caprins	$1,2 + 3,19PVad^{0,28} \times PV^{-0,28}$	$6,75PVad^{0,28} \times PV^{-0,28}$	0,40	1,20	1,00	1,80
Ovins	$1,2 + 3,19PVad^{0,28} \times PV^{-0,28}$	$6,75PVad^{0,28} \times PV^{-0,28}$	0,40	0,90	0,70	1,80
Gestation (derniers tiers)						
Bovins	$7,38/1 + e^{(19,1 - 5,46 \times \log (sg))}$	$23,5/1 + e^{(18,8 - 5,03 \times \log (sg))}$	0,30	1,30	1,00	1,00
Caprins	0,60 - 1,20*	1,00 - 2,00*	0,05	0,30	0,40	0,30
Ovins	0,40 - 0,90*	0,70 - 1,50*	0,03	0,30	0,40	0,20
Lactation (par kg de lait)						
Bovins	0,90	1,25	0,15	0,45	1,15	1,50
Caprins	0,95	1,25	0,15	0,45	1,30	1,80
Ovins	1,50	1,90	0,18	0,45	1,15	1,40

PVad : poids vif adulte en kg. PV : poids vif en kg.

sg : semaine de gestation.

* : selon la taille de la portée (simple-double).

Le besoin journalier global de l'animal résulte de la somme des besoins d'entretien et de production. Du fait des difficultés d'accès aux variables utilisées notamment la MS réellement ingérée, le tableau 10 propose pour le Ca et le P, quelques simplifications pratiques pour les relier au besoin énergétique.

Tableau 10 : Apports journaliers recommandés globaux (entretien + production) de phosphore et de calcium basés sur le besoin énergétique (Meschy, 2007).

	Phosphore (g/j)	Calcium (g/j)
Vaches laitières		
En lactation	2,80 UFL - 5,65 (0,99)	3,51 UFL - 7,65 (0,99)
En gestation	0,80 UFL + 10,20 (0,66)	2,67 UFL - 4,20 (0,99)
Vaches allaitantes		
En lactation	2,30 UFL - 1,77 (0,99)	3,00 UFL - 3,47 (0,99)
En gestation	1,47 UFL + 3,35 (0,97)	2,38 UFL - 1,55 (0,99)
Chèvres laitières		
En lactation	2,80 UFL - 0,50 (0,99)	3,31 UFL - 1,07 (0,99)
En gestation, 1 chevreau	1,20 UFL + 1,10 (0,72)	1,66 UFL + 0,93 (0,85)
En gestation, 2 chevreaux	2,00 UFL + 1,50 (0,72)	1,66 UFL + 1,93 (0,84)

(entre parenthèses : coefficient de détermination R²).

5.2.1.2. Le soufre les oligoéléments minéraux majeurs

L'apport journalier recommandé (AJR) est défini entre les seuils de carence et de toxicité, avec une marge de sécurité pour tenir compte des variations entre animaux et aliments (tableau 11). En ce qui concerne le soufre (S), il est essentiel pour les micro-organismes du rumen, la synthèse du cartilage et la production de fibres. Les besoins sont d'environ 2 g de S par kg de MS pour les ovins et les bovins, et entre 2,2 g (pour la croissance) et 2,7 g (pour les fibres textiles) pour les caprins. Lorsqu'on utilise des sources d'azote non protéique, comme l'urée, le besoin en S augmente pour la synthèse des acides aminés soufrés. Cependant, un excès de soufre (au-delà de 3-3,5 g/kg de MS) peut nuire à l'absorption de certains minéraux comme le cuivre (Cu) et le zinc (Zn).

Tableau 11 : Apports journaliers recommandés (AJR) en oligo-éléments en mg/kg de MS de la ration (adapté par INRA 1988).

Élément	Seuil de carence	Apport journalier recommandé	Seuil de toxicité	Maximum réglementaire
Cuivre	7	10	Ovins : 15 Bovins et caprins : 30	Ovins : 15 Bovins et caprins : 25
Zinc	45	50	250	150
Manganèse	45	50	1000	-
Sélénium	0,1	0,1	0,5	0,5
Cobalt	0,07	0,3	10	2
Iode	0,15	0,2-0,8*	8	
Molybdène	-	0,1	3	-

5.2.1.3. Les vitamines

Le tableau 12 présente les AJR en vitamines A, D et E en UI/kg de MS selon la proportion d'aliments concentrés de la ration. Pour la vitamine A, la supplémentation recommandée (NRC., 2001) de 110 UI/kg PV correspond à des rations contenant 50 à 70% d'aliments concentrés. Pour ce type de régime, la destruction de la provitamine A dans le rumen est autour de 70 %, alors qu'elle n'est plus que de 20% pour des régimes à base fourragère. En fin gestation, l'apport de vitamine A peut être majoré de 50%.

Pour la vitamine D, compte tenu de sa très faible concentration dans les végétaux, il n'y a que peu de différence entre AJR et supplémentation. Pour la vitamine E en reprenant la même approche que pour la vitamine A on aboutit aux AJR pour des rations contenant des proportions modérées d'aliments concentrés.

Tableau 12 : Apports journaliers recommandés en vitamines en UI/kg de MS selon la proportion d'aliments concentrés de la ration.

	Moins de 40 % de concentré	Plus de 40 % de concentré	Limite de toxicité
Vitamine A			
Lactation	4200	6600	
Gestation	6000	9000	66000
Vitamine D	1000	1000	10000
Vitamine E			
Lactation	15	40	
Gestation	25	-	2000

5.2.2. Besoins en minéraux et vitamines chez les oiseaux

5.2.2.1. Oiseaux en croissance

Contenu des performances moyennes des diverses espèces d'oiseaux, on peut résumer les normes de besoins (exprimés comme recommandations en concentration par rapport à l'énergie métabolisable dans le tableau 13.

Tableau 13 : Recommandations en macroéléments des oiseaux en croissance (g/1000 kcal d'énergie métabolisable).

Age (j)	Calcium (CA)	Phosphore disponible (P)	Sodium (Na)	Potassium (K)	Chlore (Cl)
poulet					
0-21	3,14	1,35	0,46	0,63	0,38
22-42	2,50	1,25	0,46	0,63	0,38
43-abb.	2,30	1,05	0,46	0,63	0,38
Dindonneau					
0-28	3,76	1,80	0,46	0,75	0,38
28-84	3,35	1,67	0,46	0,70	0,38
Pintadeau					
0-28	3,14	1,35	0,42		0,36
29-56	3,12	1,20	0,38		0,34
57-abb.	3,10	1,00	0,38		0,34

5.2.2.2. Pondeuses

Parmi tous les minéraux, macro ou oligoéléments, le calcium doit être apporté en grande quantité à la poule lorsqu'elle assure la formation de la coquille. La teneur en calcium dans l'aliment doit être au moins égale à 3,5% pour obtenir des coquilles solides.

Les vitamines, qui doivent être apportés sous forme de pré-mélange dans l'aliment de la poule pondeuse sont indiqués dans le tableau 14.

Tableau 14 : Addition recommandées de vitamines dans les aliments destinés aux pondeuses (en croissance ou en ponte) (UI ou ppm = g/tonne)

Vitamines	Unité de mesure	Croissance	Ponte
Vitamine A	UI/kg	10 000	8 000
Vitamine D3	UI/kg	2 000	1 600
Vitamine E	ppm	10	10
Vitamine K3	ppm	1	2
Vitamine B1	ppm	1,5	1,5
Vitamine B2	ppm	5	4
Ac. pantothénique	ppm	5	5
Vitamine B6	ppm	3	2
Vitamine B12	ppm	0,02	0,01
Vitamine PP	ppm	30	20
Acide folique	ppm	0,2	0,4
Biotine	ppm	-	-
Choline	ppm	500	500

5.3. Effets de carence ou excès nutritionnels

5.3.1. Les minéraux majeurs

➤ Calcium et phosphore

Le calcium et le phosphore sont quantitativement les plus importants avec 75% des minéraux de l'organisme. Toute carence en l'un de ces éléments affecte la croissance et provoque des accidents osseux, rachitisme chez les jeunes, ostéomalacie chez les adultes.

Pendant la lactation, le mécanisme de régulation du métabolisme phosphocalcique peut être perturbé, provoquant une maladie métabolique, l'hypocalcémie vitulaire (fièvre de lait).

L'effet de la carence en phosphore sur la reproduction est net : absence de chaleurs ou chaleurs non décelables, baisse de fertilité, diminution du taux d'éclosabilité des œufs. Quant à la carence en calcium, elle perturbe le développement et la viabilité du fœtus, la chute de la production laitière résultant d'une carence en calcium entraîne une plus forte mortalité périnatale,

Pour la ponte, le calcium joue un rôle essentiel sur la solidité de la coquille. Si l'apport est inférieur à 4g/j, les coquilles seront minces et les œufs fragile et difficiles à commercialiser.

➤ Magnésium

Les conséquences d'une carence en magnésium sont principalement nerveuses : tétanie d'herbage chez les vaches laitières, tétanie magnésienne chez les veaux et les volailles.

➤ Sodium et chlore

Le sodium et le chlore sont des électrolytes essentiels à localisation essentiellement extracellulaire. Les symptômes ne sont pas toujours très marqués (léchage, diminution de l'appétit), et peuvent être évités par la distribution simultanée sous forme de sel NaCl.

5.3.2. Les oligoéléments minéraux

Les oligoéléments jouent essentiellement un rôle catalytique. Les symptômes de carence sont très divers et le plus souvent plus spécifiques. Néanmoins, toutes les carences provoquent un déficit de croissance, une chute de production et de l'infécondité (tableau 15).

Tableau 15 : Principaux symptômes de carences des oligoéléments (Drogoul et *al.*, 2004).

	Fer		Cuivre		Cobalt		Iode		Manganèse		Zinc		Sélénium	
	A	J	A	J	A	J	A	J	A	J	A	J	A	J
Déficit de croissance		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		
Chute de P° du lait			+		+		+				+			
Inappétence		+	+	+	+	+	+	+			+	+		
Anémie		+		+	+	+								
Défaut d'aplomb			+	+					++	++	+	+		
Boiterie			+	+					+	+	+	+		+
Troubles cardiaques			+	+										+
Dyspnée			+	+										+
Goitre							++	++						
Infécondité			+		+		+		+		+			
Dégénérescence musculaire														++

A : adulte ; J : jeune ; ++ : symptômes les plus spécifiques

5.3.3. Les vitamines

Dans le cas des vitamines, il s'agit d'éviter à la fois les problèmes de carence ou de sub-déficience et ceux d'hypervitaminose pouvant conduire à la mort de l'animal.

Trois sources possibles de carence (partielle ou totale) peuvent être rencontrées chez l'animal :

- la carence d'apport : lorsque l'aliment est dépourvu ou insuffisamment pourvu en vitamines, c'est le cas de la plupart des matières premières ;
- la carence d'utilisation : les vitamines sont détruites ou rendues inefficaces ;
- la carence métabolique : elle est due à la présence de substances antagonistes (anti-vitamines).

Le tableau 16 résume les effets de carence et d'excès pour les principales vitamines sur les animaux.

Tableau 16 : Effets de carence et d'excès pour les principales vitamines sur les animaux.

Vitamine	Effets de carence	Effets d'excès
Vit. A	<ul style="list-style-type: none">- Réduit la croissance- problèmes de vision (cécité nocturne)- sensibilité aux infections- affecte la reproduction	<ul style="list-style-type: none">- anomalies osseuses- problèmes de peau- toxicité hépatique.
Vit. D	<ul style="list-style-type: none">- rachitisme chez les jeunes- ostéomalacie chez les adultes- troubles musculaires (tétanie)	Une supplémentation excessive peut entraîner : <ul style="list-style-type: none">- calcification des tissus mous- dommages rénaux et la mort.
Vit. E	<ul style="list-style-type: none">- maladie du muscle blanc (dégénérescence musculaire) chez les agneaux, veaux et poulets.	Une supplémentation excessive peut interférer avec l'absorption d'autres vitamines.
Vit. B1 (Thiamine)	<ul style="list-style-type: none">- troubles nerveux et neurologiques, notamment chez les ruminants	Rares
Vit. B2 (Riboflavine)	<ul style="list-style-type: none">- problèmes de peau et de pelage- problèmes oculaires	Rares
Vit. K	<ul style="list-style-type: none">- troubles de coagulation	Une surdose peut interférer avec l'action des anticoagulants

Références bibliographiques

- Christine Cuvelier Ch., Dufrasne I., 2021. L'alimentation de la vache laitière : Aliments, calculs de ration, indicateurs d'évaluation des déséquilibres de la ration et pathologies d'origine nutritionnelle. Livret de l'Agriculture. Université de Liège. 105p
- Drogoul C., Gadoud R., Joseph M.M, Jussiau R., Lisberney M.J, Mamgeol B., Montméas L., Tarrit A. 2004 : Nutrition et alimentation des animaux d'élevage, éd. Educagri, tome 1, 271 p.
- Duchadeau C., 2001. Vitaminothérapie chez les volailles. Médecine vétérinaire et santé animale. 170p
- Dusart. L, 2015. Cahier technique : Alimentation des volailles en agriculture biologique. ITAB (Institut Technique de l'Agriculture Biologique). Paris, P68
- INRA, 1988. Alimentation des bovins ovins et caprins, Jarrige R. (Ed.), INRA Editions, Paris, France, 471p.
- INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux. Valeur des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quæ, Paris, France, 307p.
- INRA, 2010. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux. Valeur des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quæ, Paris, France, 315p
- Larbier M., Leclercq B., 1992. Nutrition et alimentation des volailles. Inra Edition. 368p
- Lebas F., 2008. Physiologie digestive et Alimentation du lapin. Enseignement Post Universitaire «Cuniculture : génétique – conduite d'élevage – pathologie». Hammamet (Tunisie), avril 2008. 49p
- Meschy F., 2007. Alimentation minérale et vitaminique des ruminants : actualisation des connaissances. INRA Prod. Anim., 2007, 20 (2), 119-128
- Meyer C., 2009. Influence de l'alimentation sur la reproduction des bovins domestiques. Cirad. 52p
- NRC., 2001. National Research Council, 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. 7th revised Ed., National Academy Press Washington DC, 381p.
- Petit M., Agabriel J., 1993. Etat corporel des vaches allaitantes Charolaises : signification, utilisation pratique et relations avec la reproduction. INRA Productions animales. 1993. Vol. 6, n° 5, p. 311-318.
- Terral H., Laurent A., 2019. Impact du déficit énergétique sur les performances de reproduction de troupeaux allaitants suivis dans le cadre d'une clientèle vétérinaire. Médecine vétérinaire et santé animale. 93p
- WOLTER R., 1988. Besoins vitaminiques des ruminants. INRA Prod. Anim., 1 (5), 311-318.