

# Alimentation des bovins, ovins et caprins

Besoins des animaux – Valeurs des aliments

Tables Inra 2007





# Alimentation des bovins, ovins et caprins

Besoins des animaux – Valeurs des aliments

Tables Inra 2007, mise à jour 2010

Éditions Quæ  
c/o Inra, RD 10, 78026 Versailles Cedex

© Éditions Quæ, 2010

ISBN : 978-2-7592-0874-6

ISSN : 1952-2770

Le code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, Paris 6<sup>e</sup>.

# Sommaire

<b>Remerciements</b>	5
<b>Avant-propos</b>	7
<b>1 – Principes de rationnement des ruminants</b>	
Caractéristiques de l’animal et besoins alimentaires	9
Caractéristiques des aliments concentrés et des fourrages	10
Méthode de rationnement	11
<b>2 – Alimentation des vaches laitières</b>	
Les bases du calcul des rations des vaches laitières	23
Les stratégies d’alimentation des vaches laitières	31
<b>3 – Alimentation des vaches allaitantes</b>	
Besoins alimentaires	60
Capacité d’ingestion	62
Apports alimentaires recommandés	62
Alimentation des veaux sous la mère	66
La vache allaitante au pâturage	67
<b>4 – Alimentation des veaux et génisses d’élevage</b>	
Veaux d’élevage	77
Génisses d’élevage	79
<b>5 – Alimentation des bovins en croissance et à l’engrais</b>	
Les principaux types de production de viande bovine	91
Les besoins des bovins en croissance et à l’engrais	93
Capacité d’ingestion et quantités ingérées	99
Apports alimentaires recommandés	100
Calcul de rations en stabulation	102
Alimentation au pâturage	107

<b>6 – Alimentation des ovins</b>	
Besoins et recommandations	123
Exemples de calcul de rations	128
<b>7 – Alimentation des caprins</b>	
Les dépenses et besoins des chèvres laitières	139
L'ingestion	144
Les réponses marginales multiples aux apports d'aliments concentrés	145
L'alimentation en lots	146
Le pâturage et le parcours	146
Les autres caprins	147
Le calcul des rations	147
<b>8 – Valeur alimentaire des fourrages et des matières premières : tables et prévision</b>	
Les constituants organiques et leur digestibilité	154
La détermination de la digestibilité de la matière organique	158
La détermination de la teneur en énergie nette des aliments	160
La détermination de la valeur azotée des aliments	161
La détermination de la valeur d'encombrement des fourrages	165
Les minéraux majeurs, phosphore (P) et calcium (Ca), et leurs coefficients d'absorption réelle (CAR)	167
<b>9 – Les tables de la valeur des aliments</b>	
Classement des aliments	185
Signification des abréviations	186
Définition des stades de végétation des fourrages	187
Tableaux de la valeur des aliments	188
<b>Annexes</b>	281
<b>Liste des abréviations</b>	291
<b>Lexique</b>	295
<b>Liste des auteurs</b>	309

# Remerciements

Cet ouvrage n'aurait pas pu être réalisé sans la contribution efficace d'un très grand nombre de personnes que les auteurs tiennent à remercier vivement :

Le personnel des unités et installations expérimentales ou des services techniques qui ont permis le suivi des vaches laitières, allaitantes, brebis, chèvres, animaux à l'engrais, la gestion et le traitement des données expérimentales : Le Pin au Haras, Marcenat, Les Monts Dore, La Fage, Méjusseau-Le Rheu, Grignon, Montpellier, Theix, Lusignan.

Les différents lecteurs auxquels les versions provisoires ont été soumises et qui par leurs remarques critiques ont permis de les amender :

- J.-B. Coulon, C. Agabriel, C. Sibra pour le chapitre 1 ;
- C. Agabriel, N. Bareille, J.-B. Coulon, J. Flament, J.-L. Peyraud, C. Philippeau, B. Rémond pour le chapitre 2 ;
- F. Blanc, A. Lamadon pour le chapitre 3 ;
- J.-Y. Porhiel, C. Sibra pour le chapitre 4 ;
- R. Dumont, M.-P. Oury pour le chapitre 5 ;
- F. Blanc, C. Buisson, B. Drux, C. Vacaresse pour le chapitre 6 ;
- Y. Lefrileux, P. Morand-Fehr, A. Pommaret pour le chapitre 7 ;
- L. Delaby et J.-B. Coulon pour le chapitre 8.

Enfin nous voulons remercier particulièrement M.-H. Farce pour ses propositions constructives sur l'écriture des documents et leur présentation, M.-O. Nozières pour son investissement au lancement du projet, D. Bollot, J. Veltz et V. Mary pour la mise en forme de l'ouvrage final.



# Avant-propos

J. AGABRIEL

Près de vingt ans après, le livre rouge de l'« Alimentation des bovins, ovins et caprins » proposé par l'Inra sous la direction de R. Jarrige, il est apparu nécessaire d'actualiser les connaissances des principes du rationnement des ruminants, sur la base des acquis récents de la recherche en matière d'alimentation et de nutrition.

Les animaux, les fourrages et les aliments ont en effet évolué au cours de ces années, et parallèlement les conditions d'environnement économique de l'exploitation d'élevage, et le métier d'éleveur se sont radicalement transformés. Si la mécanisation de l'exploitation, la taille des troupeaux et les niveaux de production ont continué d'augmenter, en revanche la recherche de la production maximale a fait place à la volonté d'atteindre un triple optimum biologique, technique et économique selon le milieu dans lequel l'élevage est conduit.

L'alimentation des animaux et des troupeaux est considérée comme un point clé de cet équilibre à la fois par son importance économique, et la charge de travail qu'elle engendre. Chaque année de nombreux éleveurs et techniciens s'interrogent sur l'optimisation des rations avec des fourrages dont les valeurs alimentaires sont par nature toujours très variables.

Pour aider à l'alimentation des ruminants dans ces conditions évolutives, les travaux des équipes de recherches situées sur les centres Inra de Clermont-Ferrand-Theix, Rennes-Saint-Gilles, Montpellier et Paris-Grignon ont permis au cours de cette période de progresser aussi bien sur la caractérisation de la valeur des fourrages et des matières premières, que sur l'estimation des besoins et des apports recommandés. Au-delà des recommandations statiques, focalisées sur l'objectif de satisfaire les besoins des différents types d'animaux, nous proposons des lois de réponses aux pratiques alimentaires qui permettent de mieux s'adapter à la diversité des situations.

Le développement de l'informatique introduit de nouvelles méthodes de travail. La maîtrise quasi généralisée des « tableurs » permet maintenant à chacun de calculer rapidement et de faire aisément des essais simples de rationnement. Pour faciliter cela, nous avons donc décrit une méthode de calcul qui s'applique à toutes les productions et quand cela était possible, proposé des équations qui permettent d'estimer aisément valeur des aliments, besoins alimentaires et apports recommandés à partir des nombreuses variables explicatives décrites.

Cet ouvrage propose à la fois des nouveautés que nous estimons suffisamment validées et des reprises de l'édition précédente afin de présenter ensemble les « tables de la valeur des aliments » et « les recommandations alimentaires Inra » pour toutes les productions de ruminants. Un cédérom vient également au secours des éditeurs qui ne peuvent pas sur une même ligne indiquer aisément les 50 critères qui composent la valeur nutritionnelle d'un aliment. Pour intégrer tous ces apports, nous n'avons donc pas eu à « faire la révolution », mais simplement à nous positionner dans le prolongement des travaux antérieurs, ce qui a été rendu possible par le socle robuste et validé que nous ont laissé nos prédécesseurs.

En complément, le logiciel de référence INRAtion, outil de calcul de rations associé à ces recommandations, connaît une nouvelle évolution. Il est proposé à l'utilisateur dans une nouvelle version, accompagné de l'outil PrévAlim qui permet de réaliser des prévisions de la valeur des aliments.

Cet ensemble permet ainsi de mieux analyser la diversité des solutions face à un problème de rationnement, d'en détailler les divers résultats, et amène une série d'outils complémentaires : rendements marginaux, rationnement de groupes d'animaux, calcul de rejets azotés, rationnement complémentaire à la pâture...

# 1

## Principes de rationnement des ruminants

J. AGABRIEL, D. POMIÈS, M.-O. NOZIÈRES, P. FAVERDIN

Le rationnement a pour objectif de calculer les quantités d'aliments à distribuer à un animal pour lui permettre d'assurer au mieux la couverture de ses besoins d'entretien et de production en énergie, azote, minéraux, oligo-éléments et vitamines.

Dans certains cas, il n'est pas possible ou il n'est pas nécessaire de couvrir complètement les besoins : l'animal peut prélever transitoirement dans ses réserves corporelles les nutriments qui lui manquent et adapter sa production. Les recommandations alimentaires proposées dans cet ouvrage par l'Inra tiennent compte des déficits tolérables et prévoient leur compensation ultérieure.

La méthode de rationnement présentée ici, commune à tous les ruminants, est calquée sur la méthode utilisée dans le logiciel INRAtion. Elle est réalisable manuellement ou avec l'aide d'une calculatrice ou d'un tableur. Elle vise à satisfaire les recommandations correspondant à un objectif de production en maximisant l'apport de fourrages, sans tenir compte du coût global de la ration.

Dans un premier temps, le rationnement nécessite de préciser les caractéristiques de l'animal pour lequel la ration est élaborée, puis la nature et les caractéristiques du (ou des) fourrage(s) de base et des autres aliments de cette ration. On considère ici que l'eau de boisson est de bonne qualité et disponible en quantité suffisante.

### Caractéristiques de l'animal et besoins alimentaires

La première étape du rationnement consiste à renseigner, pour l'animal considéré, un certain nombre de caractéristiques zootechniques : son espèce (bovin, ovin, caprin), son type de production (lait, viande, élevage), sa race, son sexe, son âge, son poids, son gain de poids et son état corporel. Pour les animaux laitiers, il faut également renseigner les indicateurs de la lactation : le stade, le potentiel laitier, la quantité et la composition du lait produit (taux butyreux et protéique).

Ces informations permettent d'évaluer, en se reportant au chapitre correspondant de cet ouvrage, les besoins en énergie (exprimés en unités fourragères, ou UF), en protéines (exprimés en grammes de protéines digestibles au niveau de l'intestin, ou PDI) et en minéraux (exprimés en grammes de calcium et de phosphore absorbables) et la capacité d'ingestion (CI) de l'animal (exprimée en unité d'encombrement, ou UE).

**Exemple 1** – Vache laitière adulte en pleine lactation (16<sup>e</sup> semaine), multipare âgée de 40 mois, pesant 700 kg, de note d'état d'engraissement 2,5, dont le potentiel laitier est de 41 kg au pic de lactation et donc avec une production potentielle de 34 kg de lait (tableau 2.1) à 40 g/kg de taux butyreux et 32 g/kg de taux protéique.

Ces caractéristiques permettent de calculer, à l'aide des équations du chapitre 2, la capacité d'ingestion et les besoins alimentaires de l'animal :

Capacité d'ingestion (CI)	19,8 UEL/j	(équation 2.3)
Besoins énergétiques	20,7 UFL/j	(équation 2.7)
Besoins azotés	2 146 g PDI/j	(équation 2.8)
Besoins en calcium absorbable $Ca_{abs}$	63 g/j	(équation 2.16)
Besoins en phosphore absorbable $P_{abs}$	51 g/j	(équation 2.17).

Le besoin physiologique (énergie, azote, minéraux) correspond à l'apport de nutriments nécessaire pour couvrir les dépenses d'entretien et de production.

*Le besoin d'entretien* est une notion qui permet d'exprimer à la fois la dépense d'énergie pour le métabolisme basal (la conservation de l'organisme, sa survie dont la thermogénèse) et l'énergie nécessaire pour que l'animal adulte conserve sa masse corporelle en quantité et qualité (composition tissulaire et chimique). Pour un animal en croissance, le besoin d'entretien est une estimation calculée par régression de la dépense qui correspondrait à une croissance nulle. Le besoin d'entretien intègre les dépenses pour l'ingestion et la digestion des rations, et les dépenses pour l'activité physique notamment le déplacement de l'animal au pâturage. Proportionnel à la surface du corps, il s'exprime généralement en fonction du poids métabolique (poids vif élevé à la puissance 0,75, soit  $P^{0,75}$ ).

*Le besoin de production* correspond aux dépenses nécessaires à la fixation de la masse corporelle pour un animal qui gagne du poids, à la conception et au développement du fœtus puis à la lactation pour une femelle au cours de son cycle de production.

Dans les chapitres suivants, les besoins des animaux des différentes espèces sont détaillés par production. Ils déterminent le plus souvent les apports recommandés, mais pour les animaux adultes faiblement productifs, le niveau d'apport peut être inférieur aux besoins sans risque pour la santé et les productions. On distingue alors les apports alimentaires recommandés des stricts besoins physiologiques.

## Caractéristiques des aliments concentrés et des fourrages

La seconde étape du rationnement consiste à rassembler les caractéristiques des différents fourrages et des autres aliments dits « concentrés » (céréales, tourteaux, sous-produits, aliments du commerce...) disponibles pour constituer la ration.

Dans le système de rationnement français proposé par l'Inra, l'aptitude de chaque aliment à être ingéré est caractérisée par sa valeur d'encombrement digestif ou de rassasiement métabolique exprimée en unité d'encombrement (UE). La valeur UE d'un aliment conditionne son ingestion par l'animal et varie en fonction du type de ruminant considéré. Trois valeurs UE ont ainsi été définies : la valeur UEM pour les ovins, la valeur UEL pour les chèvres et les vaches laitières et la valeur UEB

pour les autres bovins<sup>1</sup>. Les aliments concentrés ont un effet d'encombrement variable si bien qu'ils n'ont pas de valeur UE fixée *a priori*. Celle-ci résulte du calcul de la situation énergétique de la ration considérée. La valeur UE d'un aliment concentré dépend de sa proportion dans la ration et de la valeur d'encombrement du fourrage qui lui est associée.

La valeur énergétique d'un aliment est exprimée en unité fourragère (UF), unité arbitraire qui correspond à l'équivalent énergétique d'un kg d'orge standard. Elle prend en compte la transformation de cette énergie en viande ou en lait (concept d'énergie nette). Deux valeurs énergétiques ont été définies : les UFL pour les femelles laitières ou les ruminants ayant des besoins proches de l'entretien et les UFV pour les ruminants à forte croissance.

La valeur protéique d'un aliment est exprimée en grammes de protéines digestibles au niveau de l'intestin (PDI). Elle se caractérise par deux valeurs associées, PDIN et PDIE, qui prennent en compte l'apport en protéines pour couvrir les besoins du ruminant et l'apport en azote dégradable pour couvrir les besoins des microbes dans le rumen. Chacune de ces valeurs PDIN et PDIE est la somme des protéines potentiellement digestibles au niveau de l'intestin et non dégradées dans le rumen, et des protéines microbiennes produites dans le rumen et digestibles au niveau de l'intestin. Enfin, les aliments sont également caractérisés par leurs teneurs en minéraux majeurs absorbables ( $Ca_{abs}$  et  $P_{abs}$  en g/kg MS).

Ces informations sont disponibles, pour des aliments types et des fourrages récoltés à des stades « repères », dans les tables de la valeur nutritive des fourrages et dans les tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage<sup>2</sup>. Si l'on dispose d'analyses de la composition chimique, l'estimation des valeurs peut être affinée avec les outils informatiques correspondants (logiciel PrévAlim). Le tableau 1.1 indique les informations nécessaires au rationnement pour quelques aliments types.

**Exemple 2** – Ensilage de dactyle 1<sup>er</sup> cycle, 1 semaine avant épiaison, brins courts, avec conservateur.

Cet aliment porte le numéro FE3550 dans les tables du chapitre 9, avec les valeurs suivantes (par kg MS) :

Valeurs d'encombrement :	1,22 UEM	1,05 UEL	1,06 UEB
Valeurs énergétiques :	0,94 UFL	0,88 UFV	
Valeurs azotées :	112 g PDIN	75 g PDIE	
Valeurs minérales :	1,6 g $P_{abs}$	1,3 g $Ca_{abs}$	

## Méthode de rationnement

Comme signalé précédemment, le calcul de ration vise à couvrir les besoins nutritionnels associés à un objectif de production en maximisant la quantité de fourrage ingérée, ce qui ne signifie pas obligatoirement une ration au « moindre coût », bien que ce soit souvent le cas.

1. Jarrige R. (dir.), 1988. *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. Paris, Inra, 471 p.

2. Sauvant D., Perez J.-M., Tran G. (éds.), 2002. *Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage*. AFZ-Inra Éditions, 301 p.

La méthode manuelle de calcul présentée ici (encadré 1.1 et, en exemple pour une vache laitière, encadré 1.2) permet de combiner un fourrage (ou un mélange de fourrages de base en proportions constantes) et deux aliments concentrés, pour subvenir aux besoins de l'animal. Cette méthode reprend, en la simplifiant, celle qui est utilisée dans le logiciel INRAtion. Si le nombre d'aliments est supérieur ou si l'on veut simuler rapidement plusieurs combinaisons possibles, les calculs deviennent lourds et compliqués et il est vivement recommandé d'utiliser ce logiciel. D'autres méthodes de simplification existent, mais elles sont souvent adaptées à une espèce particulière, ou à la validation d'observations de rations en ferme.

Dans ce chapitre, il faut préciser que toutes les valeurs des aliments (fourrages et concentrés) sont toujours exprimées par rapport à leurs matières sèches (kg MS).

## Couverture des besoins énergétiques

Les apports en énergie vont dépendre essentiellement des quantités ingérées de chaque aliment et de leurs valeurs énergétiques.

### Quantité de fourrages dans la ration

Dans un premier temps, il est utile de tester si le fourrage seul (ou une combinaison connue de fourrages) est capable de subvenir aux besoins énergétiques de l'animal. Pour cela, il est nécessaire de comparer la densité énergétique minimale de la ration (DER<sub>m</sub>) à la densité énergétique du fourrage (DEF).

Si l'on utilise un mélange de fourrages en quantités proportionnelles (70 % d'ensilage de maïs + 30 % de foin par exemple), les valeurs du mélange sont les combinaisons linéaires des valeurs de chaque fourrage (en UE, UF, PDI...).

$$DER_m = \frac{\text{besoin énergétique (UFL ou UFV)}}{\text{capacité d'ingestion de l'animal (UEM, UEL ou UEB)}}$$

$$DEF = \frac{\text{teneur du fourrage en énergie (UFL ou UFV)}}{\text{valeur d'encombrement du fourrage (UEM, UEL, UEB)}}$$

Si DEF est supérieur ou égal à DER<sub>m</sub>, le fourrage peut à lui seul satisfaire les besoins énergétiques de l'animal. La quantité Q<sub>I<sub>F</sub></sub> de fourrage à distribuer (ou du mélange de fourrages en proportions fixées) se calcule ainsi :

$$Q_{I_F} = \text{besoins énergétiques de l'animal} / \text{valeur UF du fourrage (ou du mélange)}.$$

On peut alors directement vérifier que les apports azotés couvrent les besoins (p. 15).

Si DEF est inférieur à DER<sub>m</sub>, le fourrage ne peut pas à lui seul, même offert à volonté, satisfaire les besoins énergétiques de l'animal. L'apport de concentré est alors nécessaire.

**Exemple 3** – Pour la vache laitière de l'exemple 1, DER<sub>m</sub> = 1,05 (soit 20,7 UFL/19,8 UEL) et pour l'ensilage de l'exemple 2, DEF = 0,90 (soit 0,94 UFL/1,05 UEL). L'ensilage ne peut donc couvrir à lui seul les besoins de l'animal.

## Calcul de la quantité d'aliments concentrés à apporter

Le système des unités d'encombrement permet de calculer les quantités ingérées, car si l'un des aliments est offert à volonté, la somme des valeurs d'encombrement de tous les aliments doit être égale à la capacité d'ingestion de l'animal. Les quantités de matière sèche de fourrage, notée  $QI_F$ , et de concentré, notée  $QI_C$ , que l'animal est capable d'ingérer se calculent en utilisant l'équation suivante :

$$CI = (QI_F \times VE_F) + (QI_C \times VE_C) \quad (1.1)$$

où CI est la capacité d'ingestion de l'animal,  $VE_F$  la valeur d'encombrement du fourrage (en UEM, UEL ou UEB en kg de MS) et  $VE_C$  la valeur d'encombrement du concentré.

Les aliments concentrés n'ont pas de valeur d'encombrement fixe caractérisant chaque matière première. Ils présentent néanmoins une valeur UE ( $VE_C$ ) qui varie en fonction de la ration suivant l'équation :

$$VE_C = Sg \times VE_F \quad (1.2)$$

où Sg est défini comme le taux de substitution global.

En effet, lorsque l'on augmente la quantité d'aliment concentré  $QI_C$  d'une ration, l'animal réduit la quantité de fourrage qu'il consomme : il y a substitution de l'un par l'autre. C'est la substitution qui a fait l'objet d'une modélisation pour chaque espèce car on peut réaliser facilement des expériences qui permettent de la mettre en évidence et de la calculer. Dans ces conditions expérimentales, on observe que la substitution fourrage/concentré n'est pas constante et dépend de la valeur d'encombrement du ou des fourrages associés, de la quantité de concentré distribuée (en proportion de la ration) et, pour la vache laitière, de la couverture de ses besoins énergétiques. La valeur de Sg varie le plus souvent entre 0 et 1. Lorsqu'on dispose d'un ordinateur, elle est calculée automatiquement par itérations successives jusqu'à satisfaire un double système d'équations — encombrement et énergie — à deux inconnues, qui sont respectivement les quantités de fourrage et d'aliment concentré (encadré 1.1). Manuellement, on utilise le taux de substitution *moyen* par type d'animal et par type de fourrage, dont les valeurs pour les bovins figurent dans le tableau 1.2 ou, plus précisément pour chaque espèce, dans les tableaux des chapitres suivants. La quantité  $QI_F$  de fourrage et la quantité  $QI_C$  de concentré sont alors calculées une première fois de *manière approximative*.

Pour trouver l'équilibre en énergie de la ration, il faut que la somme des apports énergétiques soit égale aux besoins de l'animal :

$$[(QI_F \times UF_F) + (QI_C \times UF_C)] - E = \text{BesUF} \quad (1.3)$$

E représente le coefficient de correction des apports énergétiques. Lorsque cela est nécessaire, cette correction permet de tenir compte des interactions digestives et métaboliques qui réduisent la valeur énergétique de la ration totale. Elles surviennent à des niveaux d'ingestion élevés et pour des rations comportant des proportions importantes d'aliments concentrés. C'est le cas en particulier pour les vaches laitières : pour déterminer la nécessité, l'importance et la valeur de ce coefficient de correction, il faut se reporter au tableau 2.6. E est rarement supérieur à 2,0 UFL et ne dépasse pas 2,5 UFL. Pour les chèvres laitières, E est intégré directement aux besoins.

On peut ensuite transformer facilement les équations 1.1, 1.2 et 1.3 définies ci-dessus, pour calculer les quantités d'aliments concentrés  $QI_C$  à apporter, ainsi que

## Encadré 1.1

### Formalisation mathématique simple du calcul d'une ration à base d'un fourrage et de deux concentrés respectivement riche en énergie (C1) et riche en azote (C2) classés par le rapport PDIE/UFL (ou UFV).

NB : les noms des variables se réfèrent au texte.

*Étape 1 – Calcul des densités énergétiques de la ration objectif et du fourrage disponible*

$$DER_m = \text{BesUF} / \text{CI}$$

$$\text{DEF} = \text{UF}_F / \text{VE}_F.$$

Si  $\text{DEF} = \text{DER}_m$ , le fourrage couvre à lui seul les besoins énergétiques et  $\text{QI}_F = \text{BesUF} / \text{UF}_F$ . Aller alors à l'étape 3.

*Étape 2 – Couverture des besoins énergétiques, calcul du concentré nécessaire*

Les quantités  $\text{QI}_F$  et  $\text{QI}_{C1}$  se calculent en considérant un système de deux équations à deux inconnues que l'on peut poser ainsi :

$$\begin{cases} \text{CI} = (\text{QI}_F \times \text{VE}_F) + (\text{QI}_{C1} \times \text{VE}_C) \\ \text{BesUF} = (\text{QI}_F \times \text{UF}_F) + (\text{QI}_{C1} \times \text{UF}_{C1}) - E \end{cases}$$

avec  $\text{VE}_C = \text{Sg} \times \text{VE}_F$  et  $\text{CI} = \text{VE}_F \times [\text{QI}_F + (\text{QI}_{C1} \times \text{Sg})]$ .

La solution s'exprime ainsi :

$$\begin{cases} \text{QI}_{C1} = [(\text{BesUF} + E) - (\text{CI} \times \text{DEF})] / [(\text{UF}_{C1} - (\text{Sg} \times \text{VE}_F \times \text{DEF}))] \\ \text{QI}_F = [\text{CI} - (\text{QI}_{C1} \times \text{Sg} \times \text{VE}_F)] / \text{VE}_F. \end{cases}$$

*Étape 3 – Couverture des besoins protéiques, calcul du ou des concentrés nécessaires*

$$\text{Apports PDIE} = (\text{QI}_F \times \text{PDIE}_F) + (\text{QI}_{C1} \times \text{PDIE}_{C1})$$

Si apports PDIE = BesPDI, aller à l'étape 4 ; sinon calculer  $\text{QI}_{C2}$ .

$$\text{Si } \text{QI}_{C1} = 0, \text{QI}_{C2} = \text{BesPDI} - \text{apports PDIE} / [\text{PDIE}_{C2} - (\text{Sg} \times \text{PDIE}_F)].$$

$$\text{Si } \text{QI}_{C1} \neq 0 \text{ et } \text{UF}_{C1} \text{ peu différent de } \text{UF}_{C2},$$

$$\text{QI}_{C2} = \text{BesPDI} - \text{apports PDIE} / (\text{PDIE}_{C2} - \text{PDIE}_{C1}).$$

Alors  $\text{QI}_{C1} = \text{QI}_C - \text{QI}_{C2}$ .

Si  $\text{QI}_{C1} \neq 0$  et  $\text{UF}_{C1} \neq \text{UF}_{C2}$ , résoudre le double système à deux inconnues  $\text{QI}_{C1}$  et  $\text{QI}_{C2}$ .

On pose  $\text{BesUF}_{\text{cor}} = \text{BesUF} + E$ .

$$\begin{cases} \text{BesUF}_{\text{cor}} - (\text{QI}_F \times \text{UF}_F) = (\text{QI}_{C1} \times \text{UF}_{C1}) + (\text{QI}_{C2} \times \text{UF}_{C2}) \\ \text{BesPDI} - (\text{QI}_F \times \text{PDIE}_F) = (\text{QI}_{C1} \times \text{PDIE}_{C1}) + (\text{QI}_{C2} \times \text{PDIE}_{C2}). \end{cases}$$

Ce système n'a qu'une solution.

*Étape 4 – Vérification du bon fonctionnement du rumen :*

*calcul du rapport (PDIN – PDIE)/UF*

$$\text{Apports UF} = (\text{QI}_F \times \text{UF}_F) + (\text{QI}_{C1} \times \text{UF}_{C1}) + (\text{QI}_{C2} \times \text{UF}_{C2})$$

$$\text{Apports PDIE} = (\text{QI}_F \times \text{PDIE}_F) + (\text{QI}_{C1} \times \text{PDIE}_{C1}) + (\text{QI}_{C2} \times \text{PDIE}_{C2})$$

$$\text{Apports PDIN} = (\text{QI}_F \times \text{PDIN}_F) + (\text{QI}_{C1} \times \text{PDIN}_{C1}) + (\text{QI}_{C2} \times \text{PDIN}_{C2})$$

$$\text{Rmic} = (\text{apports PDIN} - \text{apports PDIE}) / \text{apports UF}.$$

Si  $\text{Rmic} \approx$  seuil PDI, on conserve la solution  $\text{QI}_F, \text{QI}_{C1}, \text{QI}_{C2}$ .

Si  $\text{Rmic}$  est très positif ou si  $\text{Rmic} <$  seuil PDI, on choisit d'autres aliments.

### Étape 5 – Alimentation en phosphore et calcium

$$\text{Apports } P_{\text{abs}} = (QI_F \times P_{\text{abs } F}) + (QI_{C1} \times P_{\text{abs } C1}) + (QI_{C2} \times P_{\text{abs } C2})$$

$$\text{Apports } Ca_{\text{abs}} = (QI_F \times Ca_{\text{abs } F}) + (QI_{C1} \times Ca_{\text{abs } C1}) + (QI_{C2} \times Ca_{\text{abs } C2}).$$

Le rapport des déficits, exprimé en calcium et phosphore absorbable, est donc :

$$R_{\text{minéral}} = (\text{Bes}Ca_{\text{abs}} - \text{apports } Ca_{\text{abs}}) / (\text{Bes}P_{\text{abs}} - \text{apports } P_{\text{abs}})$$

et la formule Ca/P de l'aliment minéral est :  $1,6 \times R_{\text{minéral}}$ .

les quantités des fourrages  $QI_F$  qui seront consommées par le ruminant à l'aide des équations suivantes :

$$QI_C = \frac{[(\text{Bes}UF + E) - (CI \times DEF)]}{UF_C - (Sg \times VE_F \times DEF)} \quad (1.4)$$

$$QI_F = \frac{CI - (QI_C \times Sg \times VE_F)}{VE_F}. \quad (1.5)$$

Il est nécessaire, notamment dans le rationnement des bovins à l'engrais, de procéder à une vérification de la valeur du taux de substitution choisie initialement en se reportant au chapitre spécifique de l'espèce concernée. En considérant la valeur d'encombrement du fourrage et la quantité  $QI_C$  ou la proportion de concentré déjà déterminée de manière approximative, on note la valeur précise du taux de substitution dans le tableau applicable à ce type d'animal. Si cette valeur ne coïncide pas avec la valeur moyenne suggérée dans le tableau 1.2, les quantités de fourrages et de concentrés que l'animal est capable d'ingérer doivent être réestimées en utilisant cette nouvelle valeur de  $Sg$  dans les équations précédentes.

## Apports protéiques de la ration

Après le calcul de l'énergie, il est nécessaire d'ajuster le niveau des apports protéiques. Comme décrit précédemment, chaque ration a deux valeurs azotées PDI : les PDIN sont les protéines digestibles dans l'intestin permises par l'azote de la ration et les PDIE sont les protéines digestibles dans l'intestin permises par l'énergie de la ration. Ces deux valeurs permettent de prendre en compte les particularités de l'alimentation azotée des ruminants, à savoir équilibrer les apports protéiques en fonction des apports énergétiques, à la fois pour l'animal lui-même et pour son écosystème microbien qui fabrique une part importante des protéines utilisées par l'animal.

Une ration bien équilibrée en protéines doit avoir des apports PDIE égaux aux besoins PDI, et des apports PDIN égaux ou éventuellement supérieurs aux apports PDIE.

L'apport PDIE de la ration doit donc satisfaire l'équation suivante :

$$(QI_F \times PDIE_F) + (QI_C \times PDIE_C) = \text{BesPDI}. \quad (1.6)$$

Un apport PDIN de la ration plus faible que l'apport PDIE reflète un manque d'azote dégradable pour l'écosystème microbien qu'il faudra essayer de combler si l'écart est trop important. Un léger déficit peut en effet être toléré dans certaines situations qui seront précisées plus loin.

## Couverture des besoins PDI par les apports PDIE

### CAS OÙ LE FOURRAGE PEUT À LUI SEUL SATISFAIRE LES BESOINS ÉNERGÉTIQUES DE L'ANIMAL

On vérifie que l'apport PDIE du fourrage ou du mélange ( $Q_F \times$  valeur PDIE) est supérieur aux besoins protéiques des animaux.

Si c'est le cas, il suffit ensuite de vérifier que les besoins des microbes sont satisfaits (p. 17).

Si l'apport PDIE de la ration n'est pas suffisant, il faut ajouter au fourrage (ou au mélange de fourrages) un ou plusieurs aliments concentrés « correcteurs azotés » (aliments à forte valeur PDIE et/ou PDIN par kg) pour couvrir l'écart. Dans la grande majorité des cas, les apports énergétiques resteront satisfaits voire supérieurs aux besoins car les aliments concentrés ont des valeurs énergétiques supérieures à celles des fourrages.

La quantité d'aliments concentrés à apporter peut être calculée par la formule suivante :

$$Q_{I_C} = \frac{\text{BesPDI} - (Q_F \times \text{PDIE}_F)}{\text{PDIE}_C - (S_g \times \text{PDIE}_F)}. \quad (1.7)$$

$S_g$  n'est pas simple à calculer. On peut prendre par défaut la valeur du tableau 1.2 sans commettre d'erreur importante.

### CAS OÙ LE FOURRAGE NE PEUT SATISFAIRE À LUI SEUL LES BESOINS ÉNERGÉTIQUES DE L'ANIMAL

En utilisant les quantités de fourrage  $Q_F$  et de concentré  $Q_C$  déterminées précédemment (p. 12), il est possible d'essayer de couvrir les besoins protéiques de l'animal en utilisant un ou plusieurs aliments concentrés.

Dans le cas simple où l'on ne souhaite distribuer qu'un seul aliment concentré, on peut calculer la valeur PDIE optimale de ce dernier en divisant le besoin protéique qui doit être couvert par le concentré, par la quantité d'aliment concentré nécessaire pour couvrir les besoins énergétiques :

$$\text{PDIE}_C = \frac{\text{BesPDI} - (Q_F \times \text{PDIE}_F)}{Q_C}. \quad (1.8)$$

Il suffit ensuite de rechercher dans les tables ou dans les aliments du commerce un aliment concentré ayant une valeur proche de celle-ci.

Si l'on accepte d'utiliser un second aliment concentré (concentré 2), riche en protéines, en complément d'un premier aliment concentré de type énergétique (concentré 1), il est possible de calculer la quantité de ce second aliment en divisant le manque de protéines du régime avec le seul concentré 1 par l'écart de teneur en PDIE des deux aliments concentrés :

$$Q_{I_{C2}} = \frac{\text{BesPDI} - (Q_F \times \text{PDIE}_F) - (Q_{I_C} \times \text{PDIE}_{C1})}{\text{PDIE}_{C2} - \text{PDIE}_{C1}}. \quad (1.9)$$

Ce dernier viendra se substituer en totalité au premier aliment concentré pour les apports d'énergie, en faisant l'hypothèse souvent vérifiée que les aliments concentrés ont des valeurs énergétiques généralement proches (autour de 1 UF/kg) :

$$QI_C = QI_C - QI_{C2}$$

Si les valeurs énergétiques des concentrés sont trop différentes, il vaut mieux recalculer précisément les deux quantités à distribuer sur la base des déficits UF et PDI à combler une fois que l'on connaît l'apport de fourrage  $QI_F$ . Ceci peut encore se faire sur la base d'un système mathématique simple de deux équations à deux inconnues  $QI_C$  et  $QI_{C2}$  (encadré 1.1).

Après avoir calculé les besoins en PDIE nécessaires pour satisfaire les besoins du métabolisme protéique, il faut s'assurer du bon fonctionnement du rumen en utilisant également les valeurs PDIN.

### **Vérification du bon fonctionnement du rumen : l'équilibre PDIN-PDIE**

Pour obtenir une synthèse des protéines microbiennes optimale et une digestibilité de la ration satisfaisante, la flore microbienne doit disposer en même temps d'une quantité minimale d'énergie fermentescible et de matières azotées dégradables dans le rumen, c'est-à-dire d'un apport PDIE égal à l'apport PDIN. Cet objectif est difficile à atteindre dans la pratique, mais il est possible de s'en approcher. Pour cela, il faut calculer le rapport  $R_{mic} = (PDIN - PDIE)/UF$  sur l'ensemble de la ration et vérifier qu'il est supérieur à une valeur seuil, définie par type d'animal. La ration peut être légèrement déficitaire en PDIN ( $R_{mic}$  est négatif) car les microbes du rumen peuvent valoriser une certaine quantité d'azote ammoniacal recyclée sous forme d'urée apportée par la salive. Ce seuil de tolérance est d'autant plus proche de zéro que l'animal est sensible aux variations d'apports azotés, et donc que son niveau de production est élevé. Il est par exemple de - 22 g pour une vache allaitante en gestation et de seulement - 6 g pour un taurillon en début d'engraissement, qui dépose beaucoup de protéines musculaires. Le seuil acceptable pour l'écart  $(PDIN - PDIE)/UF$  ou « seuil PDI » est précisé pour les différentes catégories d'animaux dans le tableau 1.3. Si la ration calculée ne le satisfait pas, il faut modifier la nature du concentré « correcteur azoté ».

Si  $(PDIN - PDIE)/UF$  est supérieur ou égal au seuil PDI, la ration est considérée comme acceptable malgré le fait que le bilan ainsi calculé puisse être légèrement négatif.

Si  $(PDIN - PDIE)/UF$  est inférieur au seuil PDI, il faut reconsidérer la ration avec trois possibilités :

- ajouter un aliment riche en azote fermentescible, de l'urée par exemple, pour équilibrer PDIN et PDIE. Avec de l'urée, il faut apporter 70 g d'urée pour 100 g d'écart entre PDIN et PDIE, sans excéder 250 g/j pour une vache laitière adulte (difficile à réaliser avec des fourrages secs, mais facile avec les ensilages de maïs) ;
- changer les aliments concentrés par des aliments avec un rapport PDIN/PDIE plus élevé et recommencer le calcul des quantités d'aliments concentrés avec les nouveaux aliments (par exemple changer un tourteau de colza par un tourteau de tournesol) ;
- introduire un nouveau fourrage plus riche en PDIN (ensilage d'herbe en complément d'un ensilage de maïs) pour mieux équilibrer le régime sans recourir à de nouveaux compléments.

Enfin, si  $(PDIN - PDIE)/UF$  est très positif et donc très supérieur au seuil PDI, une quantité importante d'azote va être excrétée dans l'urine et peut être source de

rejets azotés excessifs. Cette situation peut être dommageable pour des raisons environnementales et économiques. Il convient alors d'étudier la possibilité de changer les aliments concentrés par des aliments avec un rapport PDIN/PDIE plus faible (tourteaux tannés par exemple).

## Apports minéraux

Pour éviter les carences et leur conséquences, il est indispensable de réaliser le bilan minéral (besoins – apports) de la ration afin de déterminer les déficits éventuels qu'il conviendra de corriger par la distribution d'un aliment minéral adapté. Cet aliment peut être distribué en libre service ou introduit dans la ration dans des quantités déterminées. On se limitera ici aux apports de calcium (Ca) et de phosphore (P), même s'il est nécessaire d'adopter la même démarche pour tous les oligo-éléments et vitamines (dont les valeurs sont fournies dans le cédérom). Les apports de la ration se calculent par combinaison linéaire des teneurs de chaque aliment en différents minéraux, exprimées dans la même unité que celle des besoins, au *prorata* des quantités ingérées (kg MS).

Besoins et apports s'expriment en grammes d'élément absorbable : phosphore absorbable ( $P_{abs}$ ) et calcium absorbable ( $Ca_{abs}$ ) selon les dernières propositions de l'Inra<sup>3</sup>. La formule de l'aliment minéral complémentaire doit permettre de combler les déficits entre apports et besoins et de rééquilibrer si nécessaire les apports en différents minéraux. Pour cela, après avoir calculé indépendamment les deux déficits  $P_{abs}$  et  $Ca_{abs}$ , on établit le rapport de leurs déficits ( $Ca_{abs}/P_{abs}$ ).

Compte tenu des habitudes commerciales et de la réglementation, il est ensuite parfois plus commode pour le choix d'un aliment minéral de raisonner selon le rapport calculé sur les éléments totaux de la ration Ca/P. C'est possible de façon approximative en transformant les déficits de la ration exprimés en  $P_{abs}$  et  $Ca_{abs}$  en déficits de P et Ca à partir des estimations suivantes :

$$P = P_{abs}/0,65 \quad \text{et} \quad Ca = Ca_{abs}/0,40.$$

On a alors :

$$\text{déficit Ca/P} = 1,63 \times \text{déficit } (Ca_{abs}/P_{abs}). \quad (1.10)$$

Le rapport Ca/P de l'aliment minéral doit être le plus proche possible de celui des déficits. Une fois la formule Ca/P de l'aliment minéral retenue, la quantité à distribuer est obtenue en divisant le déficit en P par la teneur en P de l'aliment minéral. En effet, le phosphore est le minéral qui a le plus de risque d'être déficitaire notamment lorsque la ration est riche en fourrage.

Il faut ensuite vérifier la couverture des besoins pour les autres minéraux et vitamines et utiliser un aliment minéral dont la formule permet de couvrir l'ensemble des déficits sans créer d'excès sur les autres. Le logiciel INRAtion peut directement proposer une ou plusieurs formules d'aliment minéral complet, caractérisées par des rapports Ca/P parmi les plus couramment utilisés.

---

3. Meschy F., 2002. *Rencontres Recherches Ruminants*, (9) : 279-285 et Meschy F., Corrias R., 2005. *Rencontres Recherches Ruminants*, (12) : 221-224.