

# Le système d'alimentation INRA 2018 pour les ruminants. 1. Bases conceptuelles

Pierre NOZIÈRE<sup>1</sup>, René BAUMONT<sup>1</sup>, Anne BOUDON<sup>2</sup>, Rémy DELAGARDE<sup>2</sup>, Philippe HASSOUN<sup>3</sup>, Sophie LEMOSQUET<sup>2</sup>,  
Gaëlle MAXIN<sup>1</sup>, Bernard SEPCHAT<sup>4</sup>, Luc DELABY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR Herbivores, 63122, Saint-Genès-Champanelle, France

<sup>2</sup>PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590, Saint-Gilles, France

<sup>3</sup>CIRAD, INRAE, Institut Agro, SELMET, 34060, Montpellier, France

<sup>4</sup>INRAE, Herbipôle, 63122, Saint-Genès-Champanelle, France

Courriel : pierre.noziere@inrae.fr

■ Le système d'alimentation INRA 2018 pour les ruminants, en intégrant les interactions entre aliments et les réponses des animaux aux rations offertes, permet désormais d'adopter une démarche de conception multi-objectif et d'évaluation multicritère des rations.

## Introduction

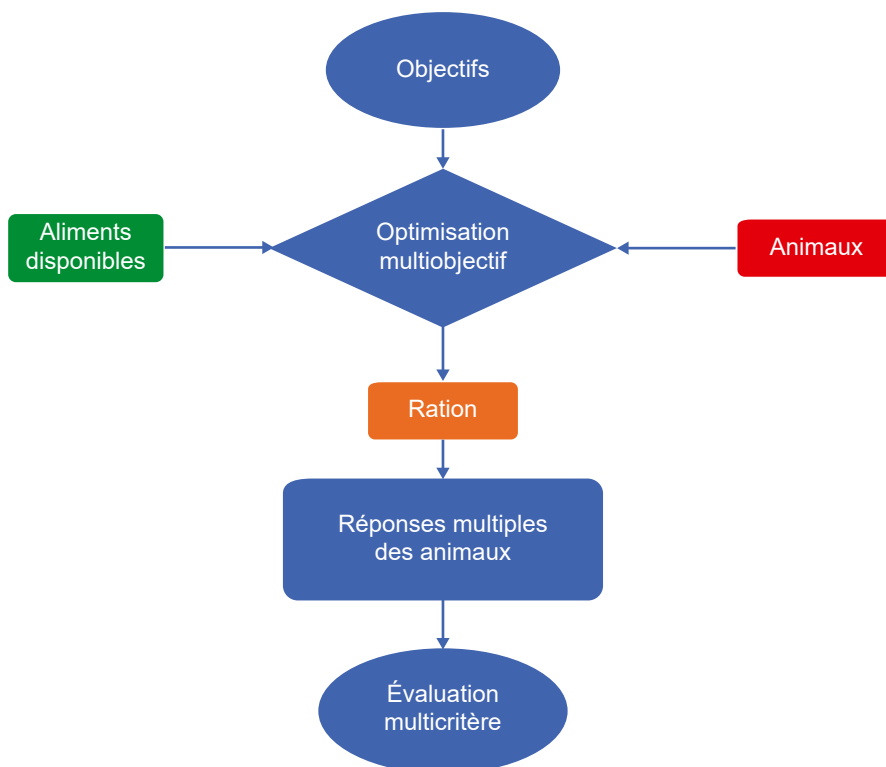
Dans tous les élevages de ruminants, l'alimentation est un poste stratégique et constitue le premier poste de dépenses en termes de coût de production. Il s'agit de proposer aux animaux des rations satisfaisant leurs besoins physiologiques et permettant un bon fonctionnement du rumen, valorisant le cas échéant leur plasticité (capacité de recyclage de l'azote et variation des réserves corporelles en particulier) tout en favorisant leur bien-être et garantissant leur santé. Ces rations doivent valoriser en priorité les fourrages et les ressources non utilisables directement pour l'alimentation humaine (coproduits) ; elles doivent limiter l'utilisation de ressources caractérisées par un impact environnemental négatif, et limiter les émissions et rejets à risques polluants. La conception des rations doit pouvoir répondre à des contraintes d'ordre pratique d'organisation du travail des éleveurs (gestion du pâturage, alimentation en lot...), ou de composition du cheptel (hétérogénéité du troupeau...). Les rations doivent égale-

ment permettre de fournir des produits animaux de qualité en cohérence avec les attentes et débouchés des filières, et avec les contraintes imposées par le cahier des charges de certaines productions sous signe de qualité. Enfin, le prix d'intérêt des aliments dans la constitution des rations entre évidemment en ligne de compte. Cette complexité et la multiplicité des objectifs et contraintes rendent nécessaire la conception de modèles et d'outils d'aide à la décision. Les systèmes d'alimentation mis en œuvre dans les outils de rationnement ont cette vocation. Ils doivent être capables, à partir d'indicateurs ou de mesures simples et peu coûteuses sur les aliments et les animaux, de proposer des rations correspondant aux objectifs de l'éleveur, et d'évaluer ces rations sur différentes dimensions (figure 1). Ils doivent également être conçus pour pouvoir s'adapter à l'évolution des ressources alimentaires, et peuvent aider à raisonner l'évolution des caractéristiques des animaux adaptés à la valorisation de ces ressources. La révision en 2018 – sous forme d'un nouveau « livre rouge » publié en anglais (INRA,

2018a) et en français (INRA, 2018b) – du système mis en place par l'INRA en 1978 (INRA, 1978) a permis une avancée majeure vers ces objectifs.

Dès 1978, le système d'alimentation INRA (INRA, 1978) a été conçu pour pouvoir s'appliquer à la diversité des systèmes d'élevage rencontrés en France. Ses évolutions successives (INRA, 1988, 2007, 2018) ont maintenu et élargi cette ambition (encadré 1). À partir d'une table de valeurs des aliments commune et d'une représentation générique des besoins et des réponses des animaux, le système INRA est un système multiespèce (bovins, ovins, caprins) et multiproduction (production de lait ou de viande), qui couvre une très large diversité de rations. Sa philosophie est de maximiser l'utilisation des fourrages, tout en pouvant s'appliquer aux rations riches en concentrés. En particulier, le système INRA 2018 prend en compte les impacts des carences en matières azotées dégradables dans le rumen ou des niveaux élevés de concentrés sur l'ingestion, la digestibilité et la valeur

Figure 1. Principes généraux du rationnement.



Le rationnement consiste à combiner différentes ressources alimentaires disponibles pour nourrir les animaux et satisfaire les objectifs définis par l'éleveur. Ces objectifs peuvent être multiples et concerner la production des animaux, la gestion de leurs réserves corporelles, l'efficacité biologique ou économique d'utilisation des ressources, et la limitation des rejets. L'optimisation multiobjectif permet de proposer une ration qui constitue le meilleur compromis entre ces divers objectifs. Cette ration aboutit à différentes réponses des animaux, qu'il est possible de prévoir pour établir *a priori* un diagnostic de la ration sur différents critères.

nutritive de la ration. L'intégration des lois de réponses de production des animaux aux apports PDI (Protéines digestibles dans l'intestin) et UF (Unités fourragères) permet d'utiliser le système non seulement lorsque l'on veut permettre l'expression de la production de référence, mais également lorsqu'une production inférieure est visée. Il intègre également les spécificités liées aux différentes conduites du pâturage, en particulier pour les vaches laitières, et à l'alimentation en lot, en particulier pour les petits ruminants.

L'objectif de cet article est de résumer les principes généraux du système INRA 2018 pour définir et prévoir les apports alimentaires et les besoins des ruminants, mais également les réponses multiples des animaux aux apports alimentaires. Le système intègre une représentation aussi complète que nécessaire mais aussi simple que possible des interactions digestives et

métaboliques sur les apports énergétiques et azotés, de même que sur les quantités ingérées, qui s'appliquent aux trois espèces. Les similarités et spécificités d'INRA 2018 par rapport aux principaux systèmes développés en Europe et aux États-Unis sont également présentées. Un second article (Nozière *et al.*, 2026) explicite comment ces concepts sont intégrés dans un outil de calcul des rations (INRAtion®V5), avec des illustrations pratiques de rationnement rencontrées sur le terrain.

## 1. Des unités communes pour définir les caractéristiques des aliments et des animaux

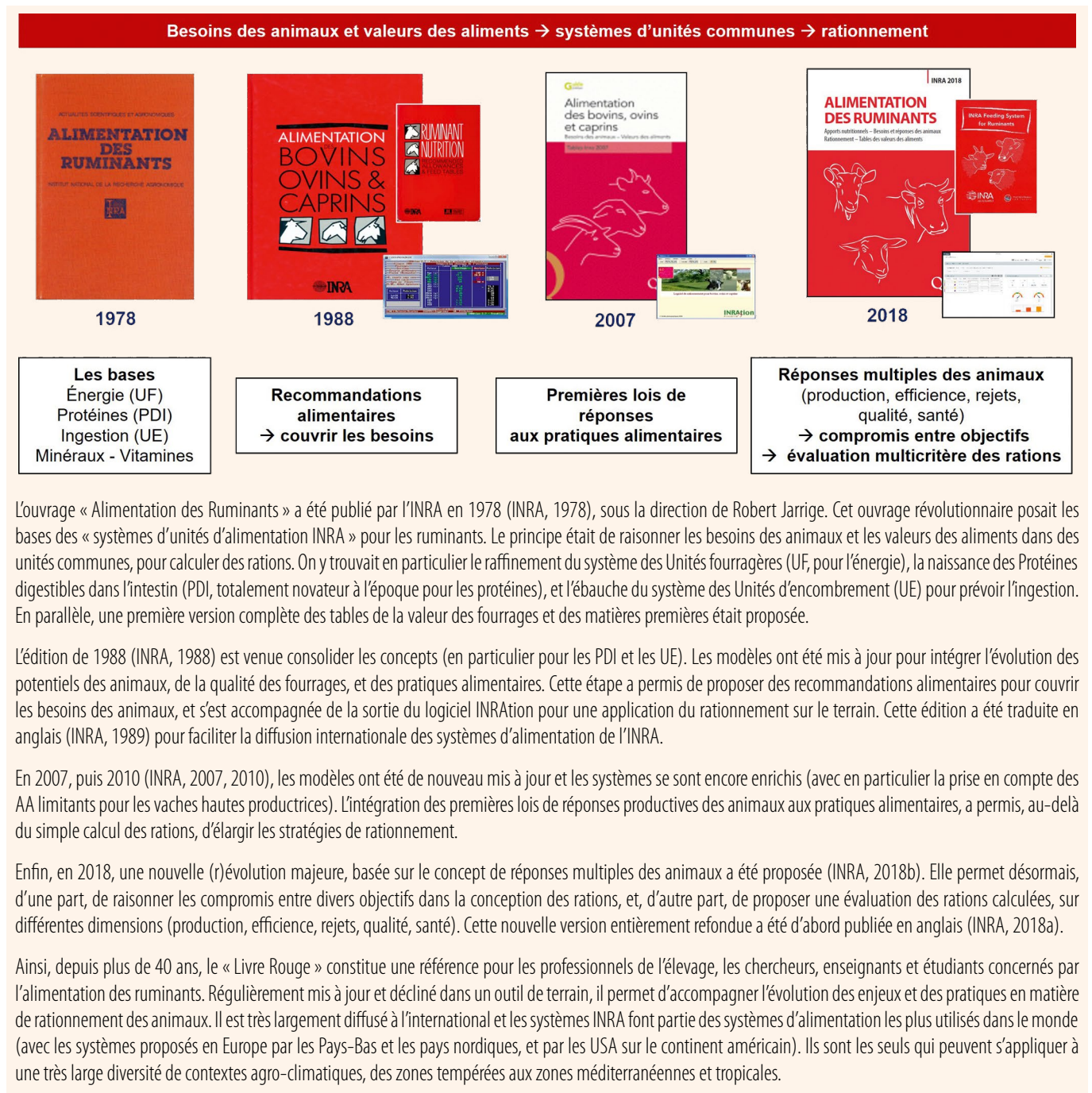
Le système d'alimentation INRA 2018 – développé par l'INRA (puis INRAE) depuis 1978 – prévoit et calcule les apports nutritifs et les besoins

nutritionnels des animaux dans des unités communes, permettant ainsi de résoudre mathématiquement les différentes problématiques de rationnement. En pratique, le rationnement permet de combiner plusieurs ressources alimentaires afin d'atteindre un ou plusieurs objectifs (production, gestion des réserves corporelles, efficacité d'utilisation des ressources et limitation des rejets...). Le système d'alimentation est composé de plusieurs modèles (communément appelés systèmes).

Le système des unités d'encombrement (UE)<sup>1</sup> permet de prévoir la capacité d'ingestion (CI) des animaux (exprimée en UE) et la valeur d'encombrement des aliments (exprimée en UE/kg MS), pour estimer les quantités ingérées (exprimées en kg de matière sèche, MS). Il se décline en trois unités distinctes pour les ovins (UEM), les vaches et chèvres laitières en lactation ou taries (UEL), et les bovins en croissance et engraissement et les vaches allaitantes (UEB). Cette distinction est basée sur le fait que les quantités volontairement ingérées, rapportées au poids métabolique des animaux, varient entre ces trois types d'animaux. La valeur d'une UE correspond à l'ingestion volontaire d'une herbe de référence ramenée au poids vif (PV) métabolique (75, 95 ou 140 g MS/kg PV<sup>0,75</sup> pour UEM, UEB et UEL, respectivement).

Le système des unités fourragères (UF) permet de définir les apports et les besoins en énergie. Il se décline en deux unités distinctes : les UFL pour les femelles laitières (vaches, brebis et chèvres en lactation, gestation, ou taries) et pour les animaux à vitesse de croissance faible ou modérée, et les UFV pour les animaux à vitesse de croissance rapide (> 1 000 g/j pour les bovins) ou à l'engraissement. Cette distinction est basée sur le fait que le rendement d'utilisation de l'énergie disponible (métabolisable, EM) en énergie nette (EN, c.-à-d. l'énergie réellement utilisée pour les fonctions physiologiques) dépend de la fonction

<sup>1</sup> Les abréviations définies à leur première occurrence dans le texte sont rappelées dans une liste à la fin de l'article.

**Encadré 1. Historique du système d'alimentation INRA pour les ruminants.**

physiologique pour laquelle l'EM est utilisée. La valeur énergétique d'une UFL et d'une UFV correspond à la valeur énergétique nette d'un kg brut d'orge de référence (1 760 kcal EN dans le système INRA 2018).

Le système des protéines digestibles dans l'intestin (PDI) permet de définir les apports et les besoins en protéines métabolisables (c.-à-d. acides aminés AA absorbables utilisables pour les fonctions physiologiques, moyennant

une certaine efficacité d'utilisation de ces PDI). Il traduit la dégradation des matières azotées totales (MAT) des aliments et la synthèse des protéines microbiennes dans le rumen, puis la digestion des protéines alimentaires et microbiennes dans l'intestin. Le système PDI se prolonge par le système des AA réellement digestibles dans l'intestin (AADL), qui permet de définir les apports et les besoins en chacun des AA indispensables, exprimés en % des PDI.

Concernant les minéraux et les vitamines, la définition des apports et des besoins est basée sur les apports bruts, à l'exception des systèmes  $P_{abs}$ ,  $Ca_{abs}$  et  $Mg_{abs}$  (P, Ca et Mg absorbables, respectivement) qui permettent de prendre en compte les variations de digestibilité réelle de ces macroéléments selon leurs sources. Enfin, le système INRA 2018 propose un modèle de prévision des apports et des besoins en eau pour les vaches et les chèvres laitières.

## 2. Les apports alimentaires

Le schéma général des apports énergétiques et protéiques, et de leur utilisation par les animaux est présenté à la figure 2.

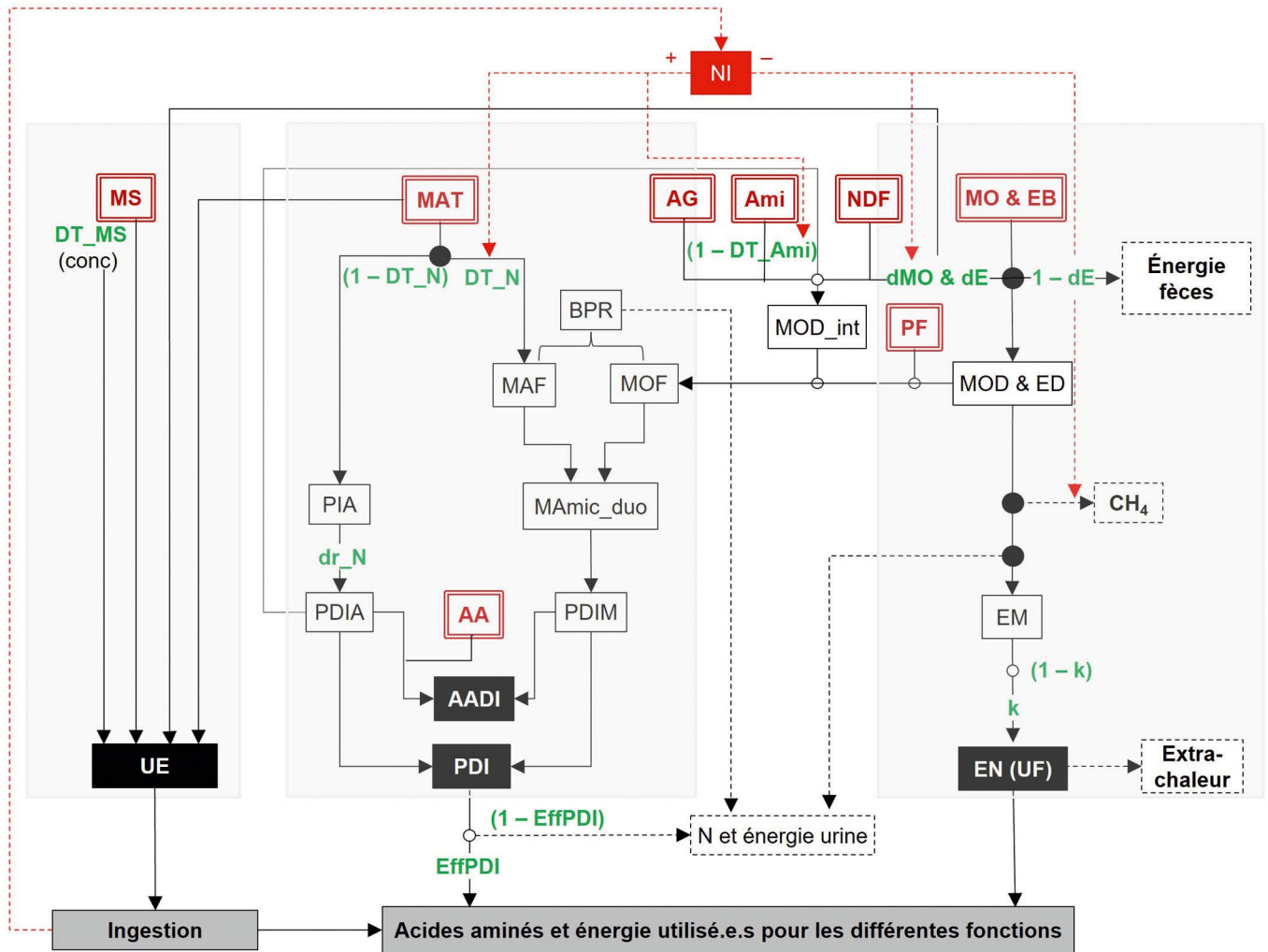
### ■ 2.1. Les processus biologiques représentés

La valeur d'encombrement des aliments (exprimée en UE/kg de MS) traduit leur capacité à être ingérés et

intègre l'ensemble des processus de régulation de leur ingestion : limitation physique liée au volume du rumen, régulation métabolique et rôle des caractéristiques sensorielles (palatabilité). Pour les fourrages, dont l'ingestion est d'abord limitée par l'encombrement physique qu'ils provoquent dans le rumen, la valeur d'encombrement est une fonction inverse de leur « ingestibilité » qui correspond à la quantité ingérée du fourrage lorsqu'il est distribué seul et à volonté (10 % de refus). Pour les aliments concentrés, qui contribuent

d'abord à la régulation métabolique des quantités ingérées, la valeur d'encombrement est estimée par leur taux de substitution avec les fourrages (quantité de fourrage ingéré en moins/quantité de concentré ingéré en plus, en kg MS/kg MS). En effet, lorsque des aliments concentrés sont introduits dans la ration, la quantité de fourrages ingérée diminue, mais la quantité totale de matière sèche et d'énergie ingérée augmente. Au pâturage, la valeur d'encombrement de l'herbe pâturée est affectée d'un coefficient de correction tenant

Figure 2. Schéma général des apports énergétiques et protéiques et de leur utilisation par les animaux, adapté de INRA (2018b).



Les abréviations sont définies dans une liste à la fin du texte.

Cadres doubles rouges : constituants alimentaires (composition chimique). Lettres vertes : efficacité digestive et métabolique (dégradabilité, digestibilité, rendement d'utilisation des nutriments métabolisables). Cadres fond blanc traits pointillés : pertes d'énergie et de protéines dans les fèces, le CH<sub>4</sub>, les urines, ou sous forme de chaleur. Cadres fond blanc traits pleins : flux et bilans digestifs intermédiaires. Cadres fond noir : unités opérationnelles pour le rationnement (UE, UF, PDI, AADI).

Tous ces critères concernent les aliments et les rations. Pour les rations, les effets des interactions digestives (liées au niveau d'ingestion, à la proportion de concentré et à la balance protéique du rumen) sur l'utilisation de l'énergie (pertes dans les fèces, le CH<sub>4</sub> et l'urine) et la dégradabilité des matières azotées (via le transit) sont représentés par un point noir (●). L'ensemble de ces critères détermine l'ingestion, ainsi que les acides aminés et l'énergie utilisés pour les différentes fonctions (entretien, productions) : cadres fond gris.

L'azote endogène duodénal, l'azote fécal, et les acides gras volatils issus des fermentations ruminales et intestinales, la partition de la digestion de l'amidon et du NDF entre le rumen et les intestins sont pris en compte dans le modèle global mais ne sont pas représentés sur ce schéma par souci de simplification.

compte de la disponibilité en herbe et du temps d'accès à la parcelle. De ce fait, quand l'herbe n'est pas offerte en quantité suffisante, l'animal ne mange pas à volonté, et sa CI n'est pas couverte.

La valeur énergétique des aliments et des rations est exprimée en UF (une UF = 1 760 kcal EN). À la teneur en énergie brute de l'aliment (EB), sont retranchées les pertes d'énergie dans les fèces (EF), dans les urines (EU, essentiellement sous forme d'urée), et sous forme de gaz (ECH<sub>4</sub>, méthane produit par les fermentations entériques) pour estimer l'énergie disponible résultante qui constitue l'EM (EM = EB - EF - EU - ECH<sub>4</sub>). L'EM est utilisée avec un rendement inférieur à 1 (lié aux pertes d'énergie sous forme d'extrachaleur) qui dépend de la nature de l'aliment et de la fonction physiologique considérée (entretien, lactation, croissance, engraissement, gestation). Pour un aliment donné, l'EN est définie par un rendement différent pour la production de lait (ENL = EM × kls), et pour la production de viande (ENV = EM × kmf). Ces rendements kls et kmf augmentent avec le ratio q = EM/EB de l'aliment.

La valeur protéique des aliments et des rations est exprimée en PDI. La valeur PDI (en g/kg MS) est la somme des AA absorbables issus de protéines d'origine alimentaire non dégradées dans le rumen (PDIA) et de protéines d'origine microbienne synthétisées dans le rumen (PDIM). Les PDIA dépendent de la teneur en MAT des aliments, de leur dégradabilité dans le rumen (DT\_N) et de leur digestibilité réelle dans l'intestin grêle (dr\_N)<sup>2</sup>. La synthèse microbienne dépend de la quantité et de la nature de l'énergie issue de la matière organique fermentée (MOF) dans le rumen. Cette synthèse est réalisée avec un rendement qui varie en fonction de l'équilibre entre matières azotées dégradables et énergie disponible. On considère que 80 % des matières azotées microbiennes transitant au duodénum (MAmic\_duo<sup>3</sup>) sont des protéines dont

2  $PDIA_{g/kg MS} = MAT_{g/kg MS} \times (1 - DT\_N_{g/g}) \times dr\_N_{g/g}$   
 3  $MAmic\_duo_{g/kg MS} = 41,67 + 71,9 \times 10^{-3} \times MOF_{g/kg MS} + 8,40 \times PCO_{g MS/g MS}$ ; pour les valeurs de référence dans les tables, on considère que PCO = 0 pour tous les aliments.

la digestibilité réelle dans l'intestin grêle est de 80 %<sup>4</sup>. Avec cette représentation, la notion de facteur le plus limitant, qui était à l'origine des concepts de PDIE et PDIN (INRA, 1988), n'a plus lieu d'être. Le même principe est appliqué aux AA individuels absorbables (AADI), en considérant que la dégradabilité dans le rumen et la digestibilité réelle dans l'intestin grêle sont identiques entre AA et que le profil en AA des protéines microbiennes est fixe.

Pour les apports en Ca, P et Mg, l'absorbabilité de Ca, P et Mg est définie comme étant leur digestibilité réelle. Une valeur d'absorbabilité est fixée par famille d'aliments pour Ca et P, alors qu'elle est calculée en fonction de la teneur en K de la ration pour le Mg. Le Na, K et Cl sont considérés comme totalement absorbables. Les apports en S, en oligoéléments et en vitamines sont raisonnés en apports totaux.

Les apports en eau de la ration sont calculés à partir des quantités ingérées et de la teneur en eau de la ration. Ils permettent d'estimer l'apport en eau de boisson nécessaire pour couvrir les besoins en eau totale de l'animal.

## ■ 2.2. Les valeurs de référence des aliments dans les tables

Les aliments sont décrits dans les tables INRA avec des valeurs de référence correspondant aux conditions de mesure *in vivo* de leur digestibilité et de leur ingestibilité (pour les fourrages).

Les valeurs des fourrages sont exprimées dans les tables pour un niveau d'ingestion à volonté du fourrage seul (Nlref, en % du PV) telles que sont réalisées les mesures de digestibilité et d'ingestibilité chez l'animal de référence (mouton adulte castré) (Demarquilly *et al.*, 1995). Les exceptions concernent le maïs vert ou ensilé pour lequel les mesures sont réalisées avec des animaux nourris en quantités limitées (Nlref fixé à 1,44 % PV) et avec une complémentation azotée - urée ou azote non protéique - et minérale permettant un fonctionnement

4  $PDIM_{g/kg MS} = MAmic\_duo_{g/kg MS} \times 0,8 \times 0,8$ .

normal du rumen. Les valeurs des pailles sont également obtenues avec une complémentation azotée. Pour les aliments concentrés, les valeurs des tables correspondent à un Nlref de 2 % du PV.

La table de la valeur des fourrages est basée sur un ensemble de plus de 2 000 mesures (une mesure est la moyenne de six moutons) réalisées chez le mouton avec des fourrages verts. Ces mesures ont permis de définir 294 fourrages verts types couvrant les principaux cycles de végétation et stades d'exploitation des prairies permanentes, de différentes espèces de graminées, de légumineuses, de céréales et de protéagineux. Les valeurs des fourrages conservés sont ensuite estimées à partir d'équations de passage entre la composition chimique, la digestibilité, l'ingestibilité et la DT\_N du fourrage vert et du fourrage conservé correspondant établies pour les principaux modes et conditions de conservation. Pour les fourrages et les aliments concentrés, les valeurs de DT\_N et de dr\_N ont été estimées à partir de données obtenues par les méthodes de mesure *in sacco* dans le rumen et dans l'intestin.

Le niveau d'ingestion, qui est positivement corrélé à la vitesse de transit, diminue la digestibilité des constituants alimentaires et leur dégradabilité dans le rumen, ainsi que l'intensité des émissions de méthane CH<sub>4</sub> (voir section 2.3). C'est la raison pour laquelle, pour chacun des aliments, Nlref est pris en compte pour estimer les pertes d'énergie sous forme de CH<sub>4</sub> (et donc les valeurs UF), la MOF (et donc la valeur PDIM), ainsi que la vitesse de transit et donc la DT\_N (et donc la valeur PDIA). La valeur d'encombrement basale des concentrés (point de départ du calcul de la valeur UE des concentrés chez la vache laitière) est assimilée au temps de séjour moyen dans le rumen (en jours). Elle est donc également calculée à partir de la dégradabilité *in sacco* de la MS dans le rumen pour un taux de transit des particules correspondant au Nlref. Les valeurs « table » de chacun des critères de valeur alimentaire, qu'ils reflètent la valeur d'encombrement, la valeur énergétique ou la valeur azotée, sont donc calculées en cohérence avec le Nlref de l'aliment.

En pratique, les principaux critères d'évaluation de la valeur de référence des aliments sont prévus à partir de modèles de prévision basés sur la composition chimique et/ou des méthodes enzymatiques de laboratoire, comme la dégradabilité enzymatique à une heure (DE1) pour prévoir la DT\_N des concentrés, et la digestibilité pepsine-cellulase (DCS ou DCO) pour prévoir la digestibilité de la matière organique (dMO) des fourrages et des concentrés (voir section 5.1).

### ■ 2.3. Les interactions digestives modifient les valeurs des aliments dans la ration

Du fait des variations du niveau d'ingestion et des interactions digestives entre aliments dans le rumen, les apports nutritifs permis par une ration ne sont pas égaux à la somme pondérée des valeurs de référence (renseignées dans les tables) des aliments constituant cette ration.

Les interactions digestives entre aliments dépendent de trois facteurs qui caractérisent la ration : *i)* le niveau d'ingestion, *ii)* la proportion de concentré, et *iii)* la balance protéique du rumen. Ces trois facteurs sont utilisés pour corriger les valeurs de référence des aliments des tables, en fonction du contexte de la ration et de l'animal qui la consomme, pour définir de façon plus précise la valeur nutritive de la ration (Sauvant & Nozière, 2013).

Le niveau d'ingestion (NI), lorsqu'il augmente, accélère la vitesse de transit des digesta dans l'ensemble du tube digestif, et notamment dans le rumen, et influence la valorisation des constituants de la ration, en raison du rôle déterminant du microbiote ruminal dans la digestion de l'énergie et des protéines chez les ruminants. Une vitesse de transit plus rapide limite l'accès des aliments aux microorganismes. Ceci a pour conséquence de diminuer la dMO de la ration (et donc sa valeur énergétique) et d'augmenter la part de protéines qui échappe à la dégradation dans le rumen et donc sa valeur PDIA.

La proportion de concentré (PCO) dans la ration influence l'équilibre des

populations microbiennes du rumen. L'augmentation de PCO induit une réduction de l'activité cellulolytique consécutive à la diminution du pH du rumen, et donc une moindre valorisation des fourrages. Cette réduction de l'activité cellulolytique est associée à une modification des profils fermentaires en lien avec la partition de la MO fermentée entre synthèse microbienne, production d'acides gras volatils et de CH<sub>4</sub>.

Enfin, la balance protéique du rumen (BPR), qui reflète l'équilibre entre les matières azotées dégradables et l'énergie disponible pour la synthèse microbienne, est la troisième interaction prise en compte, une carence en matières azotées dégradables diminuant la dMO.

Ces processus sont pris en compte dans le calcul des apports à plusieurs niveaux :

*i)* via les effets négatifs du NI et de la PCO sur la dMO (effets partiellement compensés par une diminution des pertes d'énergie sous forme de CH<sub>4</sub> et d'urine), et de l'effet positif de BPR sur la dMO<sup>5</sup> ;

*ii)* via les effets positifs de la MO digestible (MOD) et de la PCO sur la MOF, et l'effet négatif du niveau de MOF sur son efficacité d'utilisation pour la synthèse microbienne (MAmic\_duo/MOF) ;

*iii)* via l'effet accélérateur du NI (en partie compensé par un effet de stase quand la PCO augmente) sur la vitesse de transit, qui a pour conséquence de diminuer la dégradabilité des matières azotées et de l'amidon dans le rumen.

### ■ 2.4. L'apport d'aliment concentré diminue l'ingestion de fourrages : la substitution

Les interactions entre fourrages et aliments concentrés sur les quantités ingérées sont estimées par le taux de substitution, qui permet de prévoir la diminution de la quantité de fourrage ingérée à volonté lorsque des aliments concentrés sont apportés dans la ration.

<sup>5</sup> Pour chaque aliment, la valeur de N<sub>lref</sub> renseignée dans la table, et la valeur de BPR correspondant à ce N<sub>lref</sub> (BPR<sub>lref</sub>) servent de valeur pivot au calcul des effets de NI et BPR sur la dMO de la ration.

Ce taux de substitution, qui définit en grande partie la valeur d'encombrement des aliments concentrés, augmente principalement avec la quantité de concentré dans la ration, la densité énergétique du fourrage (rapport UF/UE), la valeur basale d'encombrement du concentré, et lorsque les besoins énergétiques des animaux diminuent, via leurs effets cumulés sur le bilan énergétique (chez la vache laitière). Au pâturage, le taux de substitution entre fourrages et concentrés est d'autant plus faible que la sévérité du pâturage est forte (quantité d'herbe offerte restreinte), en raison de la réduction d'ingestion d'herbe et du bilan énergétique des animaux. C'est également le cas pour la substitution herbe pâturée/fourrage complémentaire, l'apport d'un fourrage au pâturage affectant d'autant moins d'ingestion d'herbe pâturée que la sévérité du pâturage est forte.

## 3. La capacité d'ingestion et les besoins des animaux

### ■ 3.1. La capacité d'ingestion

La CI d'un animal correspond à la quantité d'Unités d'encombrement (UE) qu'il est capable d'ingérer. Elle dépend fondamentalement du poids de l'animal, de son état corporel et de son niveau de production, et d'autres facteurs qui varient selon l'espèce et le type de production. Chez les femelles laitières ou allaitantes (vaches, brebis et chèvres), la CI augmente avec le poids vif et le potentiel laitier (ou avec la croissance de la portée pour les brebis allaitantes), diminue avec la note d'état corporel (paramètre non intégré chez la chèvre faute de données suffisantes), et varie avec le stade de lactation et/ou de gestation. La parité (vaches laitières et allaitantes), la race (vaches allaitantes et brebis traitées), l'âge (vaches laitières) et les caractéristiques (poids et/ou taille) de la portée (brebis et chèvres laitières) sont également pris en compte. Chez les bovins en croissance et à l'engrais, la CI augmente avec le poids vif et dépend du type d'animal (combinaison de la race et du sexe prenant en compte la précocité et le potentiel de croissance), et diminue également avec la note d'état corporel pour les vaches de

réforme. Le modèle des UE n'est pas appliqué aux agneaux en croissance, en l'absence de mesures de référence sur leur CI ; une estimation empirique de l'ingestion des agneaux de bergerie dont le régime est très riche en concentré est proposée à partir de leur gain moyen quotidien (g/j) et de la teneur en UFV du régime. Par ailleurs, des effets spécifiques ont été introduits : la réduction de la teneur en protéines des rations diminue la CI des vaches laitières (critère retenu : PDI/UFL) et des chèvres laitières (critère retenu : MAT).

### ■ 3.2. Les besoins des animaux : une approche factorielle par fonction

Pour chacune des espèces, les besoins UF et PDI sont définis de façon factorielle et additive, par fonction physiologique : entretien et autres fonctions non productives, activité physique, lactation, gestation, croissance, et reconstitution des réserves corporelles.

#### a. L'énergie et les protéines

Les besoins d'entretien en UF et PDI dépendent essentiellement du poids de l'animal, et – pour les animaux en croissance et à l'engrais – de sa catégorie (race × sexe). Un besoin en PDI est également associé aux dépenses non productives liées à l'excrétion dans les fèces de protéines endogènes (endogène fécal), qui augmente avec la MO non digestible ingérée (Sauvant *et al.*, 2015a). Le besoin en UF pour l'activité physique (au bâtiment et au pâturage) est généralement représenté par un coefficient multiplicateur du besoin d'entretien.

Les besoins pour la production de lait dépendent de la quantité de lait produite et de sa composition. Pour les vaches allaitantes, des courbes de référence ont été ajustées en fonction de la race, de la parité et de la date de vêlage. Les besoins de gestation dépendent du poids attendu de la portée et du stade de gestation.

Les besoins de croissance des femelles laitières ou allaitantes dépendent de l'âge et – pour les chèvres – de la race. Pour les animaux en croissance ou à l'engrais, les besoins de croissance dépendent du gain de poids vif vide et

de la composition (lipides vs protéines) du gain qui varie selon les catégories d'animaux (race × sexe).

Enfin, les besoins associés à la reconstitution des réserves corporelles dépendent du potentiel de mobilisation et de reconstitution. Ce potentiel est défini, pour les vaches et les chèvres laitières, par la production laitière au pic de lactation, le stade de lactation, la note d'état à la mise bas, et – pour les vaches – la parité. Pour les brebis, cette notion de potentiel n'est pas explicitement intégrée, et le besoin dépend de la variation attendue des réserves (poids vif, variation de NEC) et de sa dynamique (durée de la reconstitution).

#### b. Les minéraux, vitamines et l'eau

Les besoins en macroéléments, à l'exception de S (Ca, P, Mg, Na, K, Cl), sont aussi déterminés par une méthode factorielle par fonction ; ils représentent ainsi la quantité de l'élément considérée comme nécessaire pour couvrir les besoins liés aux pertes fécales d'origine endogène et aux pertes urinaires minimales (besoins d'entretien ou non productifs), à l'accrétion dans les tissus corporels (besoins de croissance) ou dans le placenta (besoins de gestation), et à l'export dans le lait (besoins de lactation). Pour le P, les pertes fécales d'origine endogène sont estimées comme les pertes fécales incompressibles quelle que soit la teneur en P de la ration, afin d'exclure la composante excrétoire d'origine salivaire du P retrouvé dans les fèces. Les pertes urinaires minimales de P, Mg, K, Na, et Cl correspondent à l'extrapolation de l'excrétion urinaire pour une ingestion nulle. Les besoins de croissance correspondent au dépôt minéral dans le gain corporel, principalement d'origine squelettique. Les besoins de gestation correspondent au dépôt minéral dans le fœtus et ne sont significatifs que durant le dernier tiers de la gestation. Les besoins de lactation correspondent à la quantité du minéral considéré exportée dans le lait. Les besoins en oligoéléments et en S sont déterminés par des méthodes globales sur la base d'expériences dose-réponse.

Pour les vitamines A, D et E, les recommandations de complémentation de la

ration, établies sur la base d'essais de supplémentation publiés sans réellement prendre en compte les apports permis par la ration de base (NRC, 2001, 2007 ; NASEM, 2016), ont été adaptées afin de mieux prendre en compte la spécificité de la diversité des rations françaises.

Les besoins d'abreuvement sont définis comme la quantité d'eau qui serait bue par des animaux de mêmes caractéristiques (poids et de production laitière) abreuvés *ad libitum* (c'est-à-dire avec un accès individualisé et permanent à un abreuvoir), en conditions de thermoneutralité, auxquels sont ajoutées les pertes par sudation si la température est supérieure à 15 °C.

### ■ 3.3. Le rendement d'utilisation de l'énergie et des protéines

Le rendement d'utilisation des nutriments disponibles (EM et PDI c.-à-d. AA totaux absorbables) varie en fonction de l'aliment, du type d'animal et de la fonction physiologique considérée. Il doit donc être pris en compte dans l'estimation des besoins.

#### a. L'énergie

Les besoins énergétiques, exprimés en EN, nécessitent de prendre en compte le fait que le rendement d'utilisation de l'EM en énergie nette varie non seulement en fonction du régime ( $q = EM/EB$ ), mais également de la fonction physiologique considérée.

Pour les femelles laitières, le rendement est plus élevé pour la reconstitution/mobilisation des réserves (ktg) que pour l'entretien et la production de lait (kls). Cette différence de rendement est prise en compte dans le calcul du bilan UFL (différence entre les UFL ingérées et les besoins UFL), qui reflète le flux d'énergie stockée (bilan positif) ou mobilisée (bilan négatif) dans les réserves corporelles (Sauvant *et al.*, 2015b).

Pour les animaux en croissance et à l'engrais, le rendement est plus élevé pour l'entretien (km) que pour la croissance et l'engraissement (kpf), kpf étant lui-même plus faible quand la proportion d'énergie déposée sous forme de protéines est plus élevée.

### b. Les protéines

Le rendement d'utilisation (ou efficacité) des PDI (EffPDI) est pris en compte dans le calcul des besoins (besoin PDI = (protéines fixées + exportées)/EffPDI). Depuis la révision de 2018, l'efficacité varie non seulement selon l'animal, mais également en fonction de la ration puisque l'animal utilise les PDI selon une loi de réponse au rendement marginal décroissant, les apports qui excèdent les besoins contribuant au flux d'excrétion azotée urinaire. Par souci de simplification, au vu des données disponibles, EffPDI est considéré comme étant identique pour toutes les fonctions de protéosynthèse chez un animal donné (Sauvant *et al.*, 2015a) :

EffPDI =  $\Sigma$  protéines produites pour les différentes fonctions/PDI disponibles

avec PDI disponibles = PDI ingérés  
– PDI associés à la perte  
d'N urinaire endogène<sup>6</sup>.

EffPDI peut ainsi être utilisée comme un indicateur biologiquement pertinent de l'adéquation des apports aux besoins. Une valeur de EffPDI inférieure (vs supérieure) à la valeur retenue pour la trajectoire de référence (qui dépend de l'espèce et du stade physiologique de l'individu, voir section 4.1) indique un excès (vs un déficit) d'apport de PDI par rapport aux besoins.

## 4. Les réponses des animaux

Des modèles de réponse ont été établis pour calculer des rations dont l'objectif s'écarte de la couverture des besoins tels que définis par une trajectoire de référence (on parle alors de production objectif), et/ou pour prévoir les

6 La perte d'N endogène urinaire correspond au renouvellement tissulaire ; ce bilan (synthèse – dégradation) étant nul, le renouvellement tissulaire ne constitue ni un besoin, ni un apport sur une base nette (on suppose donc une efficacité d'utilisation de 1 pour les PDI associés à cette perte qui constitue un produit terminal du métabolisme) : PDI associés à la perte d'N urinaire endogène (g PDI/j) = 0,312 x PV, avec PV en kg.

performances des animaux face à une ration donnée (production attendue).

### ■ 4.1. Les situations de référence

Pour les femelles laitières, la situation de référence correspond aux courbes de production dites « potentielles » et de mobilisation « potentielle » des réserves (voir section 3.2). Ces courbes de référence sont basées sur la production de lait (PL) au pic de lactation, les taux butyreux (TB) et protéiques (TP) moyens sur la lactation, les stades de lactation et/ou de gestation, et la parité. La notion de PL potentielle (PL<sub>pot</sub>), introduite en 2007 pour les vaches laitières (INRA, 2007), reflète la PL qui serait exprimée par une femelle bien alimentée, et sans souci de santé, ni de confort et bien-être. Cette PL<sub>pot</sub> ne représente pas la production laitière maximale possible au-delà de laquelle une augmentation des apports nutritifs serait sans réponse, mais intègre les conditions d'environnement, et donc d'expression de ce potentiel intrinsèque. Dans l'idéal, PL<sub>pot</sub> pourrait être estimée en regard de l'index génétique « Lait » disponible grâce à l'évaluation génomique. En pratique, notamment lors du calcul de la ration, la PL<sub>pot</sub> n'est pas simple à définir, mais par définition, elle doit, pour les vaches laitières, être supérieure à la PL observée et à la PL objectif. L'écart entre PL<sub>pot</sub> et la PL observée est défini par convention en % (entre + 6 et + 8 %) pour prendre au mieux en compte les situations observées sur le terrain. Quels que soient le potentiel des animaux, le stade de lactation ou le régime, la valeur de EffPDI retenue pour initialiser le calcul des besoins PDI à cette situation de référence est de 0,67 pour les vaches laitières et allaitantes et les chèvres, de 0,58 pour les brebis, et de 0,50 pour les vaches tarées.

Pour les animaux en croissance ou à l'engrais, la situation de référence correspond aux courbes de potentiel de croissance et de composition du gain (voir section 3.2). Pour les bovins, quel que soit le potentiel des animaux ou le régime, la valeur de EffPDI retenue pour le calcul des besoins PDI à cette situation de référence varie entre 0,65

(jeunes) et 0,40 (âgés), en raison de la proportion décroissante avec l'âge des protéines dans le gain. Pour les petits ruminants, en l'absence de données permettant de modéliser cette évolution avec l'âge, elle est fixée à 0,50.

Ces valeurs pivot d'EffPDI ont été définies par convention et correspondent à la valeur de EffPDI observée en moyenne pour des régimes de 100 g PDI/kg MSI.

### ■ 4.2. Les réponses de production

Lorsque les apports alimentaires diffèrent de ceux correspondant aux besoins théoriques associés à la trajectoire de référence, les animaux mettent en jeu des régulations d'homéostasie, qui conduisent à une performance (production de lait ou de viande) qui s'écarte de la trajectoire de référence.

Les réponses des femelles laitières sont calculées à partir des bilans UFL et PDI théoriques (c.-à-d. les différences entre les apports et les besoins à la référence prenant en compte la dynamique prévisible de mobilisation et de reconstitution des réserves corporelles au cours du cycle de lactation). Pour les vaches laitières, la réponse de la production de matières protéiques (MP) prend en compte les interactions entre les bilans UFL et PDI théoriques. Au-delà d'un certain niveau d'apport UFL, la réponse de MP est limitée par l'apport PDI, et *vice versa*, ce qui est cohérent avec la notion de facteur le plus limitant (UFL vs PDI) pour la synthèse protéique. On considère que la réponse de PL est proportionnelle à la réponse MP. Ces deux réponses sont ensuite répercutées sur le TP, et la réponse du TP est réévaluée au regard des apports effectifs en lysine et méthionine par rapport aux recommandations (7,0 et 2,4 % des PDI respectivement pour LysDI et MetDI). La réponse TP est enfin répercutée sur la réponse des MP et donc sur EffPDI. En revanche, la réponse de la sécrétion de matières grasses du lait et du TB ne peut être prévue de façon satisfaisante, en raison de la variabilité peu prévisible des synthèses de MG, associée entre autres, à la génétique des animaux et aux profils en AG absorbés dans l'intestin grêle.

Pour les bovins en croissance, chaque animal est défini par un format adulte, une croissance de référence et une composition du gain théorique qui seront atteints si l'alimentation n'est pas limitante. Le besoin énergétique associé à cette trajectoire de référence sert de pivot aux lois de réponse des animaux à la disponibilité en nutriments, modifiant la courbe de croissance et la composition du gain. Ainsi, lorsque l'EM ingérée augmente, la proportion relative de muscle (ou de protéines) dans le gain décroît, au bénéfice de la proportion relative de tissus adipeux (ou lipides). Un gramme de lipides contenant plus d'énergie qu'un gramme de protéines (lui-même associé à quatre grammes d'eau et de minéraux), la réponse marginale du gain d'énergie est donc plus élevée que celle du poids vif. En plus de la race, du sexe et de l'âge de l'animal, cette réponse dépend de la croissance déjà réalisée, de la composition corporelle de l'animal à l'âge donné et de la composition du gain qui en résulte, estimée par modèle. Pour les bovins, le système INRA 2018 intègre cette variabilité de réponse aux apports énergétiques pour 14 catégories d'animaux, dans des situations où l'apport protéique n'est pas limitant, ce qui est généralement le cas dans les situations courantes. Dans certaines conditions d'élevage et d'alimentation homogènes, comme celle des agneaux de bergerie, il est possible de s'appuyer sur des lois de réponses moyennes plus simples, autour d'une valeur pivot correspondant aux apports UFV ou PDI disponibles pour le gain, c'est-à-dire les UFV ou PDI ingérées moins celles utilisées pour l'entretien.

### ■ 4.3. Les autres réponses

L'alimentation a des effets importants sur d'autres réponses animales, en particulier les rejets dans l'environnement ( $\text{CH}_4$ , azote, phosphore), le confort digestif des animaux, et la qualité des produits. Les connaissances sur ces réponses multiples ont bien progressé, et même si elles ne constituent pas la base de raisonnement du calcul des rations, un des enjeux pour les systèmes est de représenter ces réponses de façon cohérente avec la représentation

du système nutritionnel, comme c'est le cas dans le système INRA 2018.

Les rejets de  $\text{CH}_4$  sont représentés de façon explicite dans le modèle des apports énergétiques (figure 2). Cette représentation simple, basée sur la MO digérée (MOD), la nature de cette MOD (via PCO) et son site de digestion (via NI), permet d'évaluer les pertes d'énergie sous forme de  $\text{CH}_4$  quelle que soit la ration. Elle pourra à l'avenir être complétée pour prendre en compte les effets spécifiques de la nature des fourrages, ou des stratégies de mitigation liées aux compléments lipidiques ou aux tannins.

Le flux d'N fécal est peu variable lorsqu'il est exprimé en fonction de la quantité de MS ingérée, (de l'ordre de  $8,4 \pm 2,0$  g N/kg MSI) malgré le fait qu'il ait trois origines : alimentaire, microbien et endogène. Il est ainsi possible de prévoir le flux d'N fécal soit simplement à partir de la MSI, soit de façon plus mécaniste en cohérence avec le système PDI à partir d'indicateurs de ces trois fractions : les indicateurs, retenus sur des critères de précision statistique, sont les protéines alimentaires entrant dans l'intestin (PIA<sup>7</sup>) pour la fraction alimentaire, MAMic\_duo pour la fraction microbienne, et les parois végétales non digestibles (NDFND<sup>8</sup>) pour la fraction endogène (en raison de l'effet « abrasif » des digesta sur les muqueuses digestives).

Le flux d'N urinaire est au contraire très variable et correspond au solde entre d'une part, l'N ingéré, et d'autre part, l'N fixé (lait, muscles, portée) et l'N fécal. Il a plusieurs origines : i) N ammoniacal en excès par rapport aux besoins des microbes et absorbé par la paroi du rumen (correspondant à une BPR positive) ; ii) N issu du catabolisme des AA qui ne participent pas à la protéosynthèse ; iii) N endogène issu du renouvellement des protéines corporelles ; et iv) N microbien purique (non protéique) absorbé dans l'intestin. Ces quatre fractions (les deux premières étant les plus

importantes) peuvent être prédites en cohérence avec le système PDI à partir de leurs indicateurs respectifs : BPR,  $\text{PDI} \times (1 - \text{EffPDI})$ , PV, MAMic\_duo.

La principale source d'inconfort digestif reste l'occurrence d'acidose clinique ou subclinique. Il est possible de caractériser ce risque à partir d'indicateurs de la composition de la ration (teneur en amidon dégradable, en NDF de fourrage, bilan électrolytique...) ou du comportement des animaux (indice de mastication...), statistiquement reliés au pH du rumen. Il est alors possible pour chaque indicateur de définir des valeurs seuil pour limiter le risque de pH moyen < 6,0 (risque fort) ou  $6,0 < \text{pH moyen} < 6,2$  (risque faible), et d'agrèger ces indicateurs en un indice global de risque.

La composition des produits (au-delà de matière protéique du lait ou de la composition du gain, voir section 4.2) reste difficile à prédire, en particulier, les réponses du taux butyreux et de la composition en acides gras du lait et de la viande. Le système propose toutefois quelques lois de réponses aux apports de concentré ou de suppléments lipidiques, mais elles sont très dépendantes de leur contexte d'application.

## 5. Les similarités et spécificités d'INRA 2018 par rapport à d'autres systèmes d'alimentation

### ■ 5.1. Les apports alimentaires

Les tables INRA de la valeur des aliments proposent une large diversité de fourrages et de matières premières par rapport aux tables des principaux autres systèmes européens (NorFor : Volden, 2011 ; CVB, 2012). Cette singularité est le fruit de l'effort systématique des mesures de la valeur alimentaire des fourrages réalisées au cours du temps dans une large gamme de situations pédoclimatiques et pour de nombreuses espèces végétales. Cela permet de couvrir la grande diversité des systèmes d'élevage existant sur le territoire français, y compris ultramarin. Néanmoins, les relations entre

<sup>7</sup>  $\text{PIA}_{\text{g/kg MS}} = \text{MAT}_{\text{g/kg MS}} \times (1 - \text{DT}_{\text{N}_{\text{g/g}}})$ .

<sup>8</sup>  $\text{NDFND}_{\text{g/kg MS}} = a - b \times \text{dMO}_{\text{g/g}}$  (avec a et b fonctions de la nature de l'aliment, fourrage vs concentré).

la composition chimique des fourrages (cellulose brute, MAT) et leur valeur alimentaire (DMO) sont similaires à celles qui peuvent être calculées pour d'autres tables, ce qui garantit la cohérence des valeurs utilisées entre différents pays.

La prévision de l'ingestion est également basée sur des unités d'encombrement dans le système nordique NorFor, ou des unités de satiété dans le système hollandais (Zom *et al.*, 2012). Les aliments sont donc caractérisés par une valeur d'encombrement (ou de satiété), les animaux par leur CI, et les effets de substitution entre fourrages et concentrés sont représentés de façon plus ou moins complexe. Contrairement aux systèmes européens qui ont adopté cette approche assez mécaniste, le NRC (USA) est basé sur une approche des quantités de MS ingérées par régression multiple qui intègre les caractéristiques des animaux et des rations (NASEM, 2021).

Tous les systèmes expriment les apports et les besoins en énergie nette d'une part et en protéines métabolisables, d'autre part.

Pour les apports énergétiques, contrairement au système INRA qui s'appuie sur une mesure globale de DMO *in vivo*, les autres systèmes ont une approche mécaniste qui nécessite d'estimer chacune des fractions organiques digérées, à partir de la composition chimique (NRC, 2001 ; VEM : Van Duinkerken *et al.*, 2011) ou d'un modèle mécaniste de la digestion (NorFor). Contrairement aux systèmes NRC et NorFor qui intègrent les interactions digestives sur la seule digestibilité, le système INRA 2018 prend en compte le fait qu'elles sont partiellement compensées au niveau de l'EM par de moindres pertes sous forme de CH<sub>4</sub> ou d'urine, et la dissociation des pertes d'énergie entre les urines et le CH<sub>4</sub>. Tous les systèmes considèrent que le rendement d'utilisation de l'EM en EN dépend de la fonction physiologique considérée, avec des rendements homogènes entre systèmes (dérivés de Van Es, 1978).

Pour les apports de protéines d'origine alimentaire, tous les systèmes sont basés sur la mesure de la dégradation

*in sacco*, les différences entre systèmes concernant essentiellement les fractions de l'azote alimentaire, leurs taux respectifs de dégradation et de transit, ainsi que leur digestibilité réelle dans l'intestin grêle. L'estimation des protéines microbiennes est invariablement basée sur l'estimation de l'énergie disponible dans le rumen et de son efficacité d'utilisation pour la croissance microbienne. L'approche retenue par INRAE est plus globale et moins mécaniste que celle retenue par les autres systèmes, qui nécessite des informations et des hypothèses sur les différents substrats fermentés, leur vitesse de dégradation, de transit, et/ou leur efficacité de conversion en protéines microbiennes (CNCPS : Fox *et al.*, 2004 ; Feed Into Milk [FiM] : Thomas, 2004 ; NorFor, 2011 ; DVE/OEB<sub>2011</sub> : Van Duinkerken *et al.*, 2011 ; NASEM, 2021).

Enfin, le NI retenu pour mesurer ou calculer les valeurs des aliments varie largement d'un système à l'autre. Pour un aliment donné, les valeurs dans les tables peuvent donc varier entre les systèmes, mais conduire au final à des valeurs de rations assez proches.

## ■ 5.2. Les besoins et les réponses des animaux

Dans tous les systèmes, les besoins en énergie nette et en protéines métabolisables sont considérés par une approche factorielle associée aux diverses fonctions (entretien, lactation, croissance...). Les coefficients et les équations, propres aux données prises en compte et leurs contextes d'application peuvent conduire à des valeurs sensiblement différentes entre systèmes. Si les rendements d'utilisation de l'énergie pour chacune des fonctions sont relativement homogènes entre systèmes (Van Es, 1978), la variabilité de l'efficacité d'utilisation des protéines métabolisables n'est prise en compte que dans NorFor et DVE/OEB<sub>2011</sub>, et NASEM 2021, mais elle est limitée à la fonction de production laitière, et n'intègre pas les interactions avec les apports énergétiques.

L'une des spécificités du modèle INRA 2018 est qu'il permet de dissocier les besoins des animaux pour exprimer

leur potentiel de croissance, de production de lait, etc. et leurs réponses à une ration donnée qui ne permet pas forcément d'exprimer leur potentiel mais qui peut être efficiente d'un point de vue économique, environnementale, etc. Par ailleurs, toutes les réponses prévues sont adossées à une même représentation relativement mécaniste de l'utilisation digestive et métabolique des nutriments (figure 2), avec des équations élaborées et validées sur des bases de données représentant une large diversité de contextes. Cette approche ambitieuse vise à garantir une cohérence globale du système pour une diversité de contextes et d'objectifs de rationnement. Si la plupart des systèmes proposent à présent des prévisions de réponses multiples, peu de systèmes ont encore adopté cette approche, et proposent des prévisions empiriques qui ont l'avantage d'être simples, mais l'inconvénient d'avoir un champ d'application plus restreint, et *a priori* une moindre cohérence globale entre les différentes réponses prévues. Les comparaisons strictes entre les dernières versions des systèmes restent rares et très partielles (Lapierre *et al.*, 2018 ; Daniel *et al.*, 2020 ; Binggeli *et al.*, 2022).

Plusieurs autres systèmes proposent une prévision mécaniste (Norfor) ou empirique (NASEM, 2021) des réponses de la production laitière à l'alimentation. Dans NorFor, la prévision de la croissance s'appuie sur les concepts équivalents à ceux proposés par l'INRA pour les taurillons (réponse aux apports énergétiques) ; pour les génisses et les bœufs, il s'agit de réponse aux apports de protéines métabolisables, dont l'efficacité d'utilisation décroît avec le poids vif de l'animal et le ratio protéines métabolisables/énergie nette du régime.

Les rejets de CH<sub>4</sub> ne sont pas explicitement représentés dans le système énergétique hollandais (VEM) (Van Es, 1978), ni dans le système nordique NorFor. Dans le NASEM (2021), leur prévision est basée sur les quantités ingérées, la composition de la ration, et le type d'animal. Dans le NorFor et dans le NRC, le flux d'N urinaire correspond à la différence entre l'N ingéré et l'N retrouvé dans le lait, le fœtus, les phanères, le gain, et les fèces, et le flux d'N fécal est estimé à partir

d'une représentation mécaniste de ses différentes composantes : alimentaire, microbienne, et endogène. Des approches empiriques plus simples sont également proposées par le NRC. Enfin, concernant la prévision des risques d'acidose, le système NorFor adopte une approche mécaniste basée sur un critère unique, l'indice de mastication (en min/kg MS), attribué à chacun des aliments, additif, et assorti de recommandations pour le calcul des rations. Le NRC, dans sa dernière version, adopte la notion de « *physically adjusted NDF* (paNDF) » (combinaison de critères physiques et chimiques de la ration), assortie de recommandations sur le pourcentage minimal de particules > 8 mm.

## Conclusion

Avec la prise en compte des interactions digestives dans la représentation des apports nutritifs, et des réponses

productives et non productives des animaux à l'alimentation, le système d'alimentation INRA 2018 pour les ruminants a vu ses potentialités d'application s'élargir. En plus du simple calcul d'une ration pour couvrir les besoins des animaux au potentiel de production, il est désormais possible d'élaborer des stratégies de rationnement répondant à d'autres objectifs, et d'anticiper les réponses multiples des animaux aux rations calculées, lorsque celles-ci sont suffisamment documentées. Des exemples pratiques sont présentés dans le second article (Nozière *et al.*, 2026).

## Contribution des auteurs

P. Nozière a rédigé l'essentiel de l'article. Certaines parties plus spécifiques ont été rédigées avec l'aide de A. Boudon (minéraux, vitamines et eau), S. Lemosquet (acides aminés), G. Maxin

(prévision des valeurs des aliments), R. Baumont (ingestion), L. Delaby (vaches laitières), R. Delagarde (pâturage et chèvres), B. Sepchat (bovins viande), Ph. Hassoun (brebis). Les coauteurs ont relu et amendé l'ensemble du texte. L. Delaby et R. Baumont ont également assuré la relecture finale.

## Remerciements

Nous rendons hommage à tous nos prédécesseurs qui ont fondé les systèmes d'alimentation pour les ruminants développés à l'INRA et les ont fait évoluer depuis 1978 jusqu'en 2018 à travers les éditions successives du « Livre Rouge ». Nous remercions l'ensemble des collègues qui ont contribué à la publication des ouvrages INRA 2018, avec une pensée spéciale pour Daniel Sauvart pour sa contribution exceptionnelle aux nouveaux concepts introduits en 2018.

## Liste des abréviations

Abréviation	Définition
AA	Acides aminés
AADI	Acides aminés réellement digestibles dans l'intestin grêle
AG	Acides gras
Ami	Amidon
BPR ; BPRref	BPR : Balance protéique du rumen ; BPRref : BPR de référence
Ca <sub>abs</sub>	Calcium absorbable
CH <sub>4</sub>	Méthane
CI	Capacité d'ingestion
DCS ; DCO	DCS : Digestibilité pepsine-cellulase de la matière sèche ; DCO : de la matière organique
dE	Digestibilité apparente de l'énergie dans le tractus digestif
DE1	Dégradabilité enzymatique à une heure
dMO	Digestibilité apparente de la matière organique dans le tractus digestif
dr <sub>N</sub>	Digestibilité réelle de l'azote dans l'intestin grêle
DT <sub>Ami</sub>	Dégradabilité théorique de l'amidon dans le rumen
DT <sub>MS</sub>	Dégradabilité théorique de la matière sèche dans le rumen
DT <sub>N</sub>	Dégradabilité théorique de l'azote dans le rumen
EB	Énergie brute
ECH <sub>4</sub>	Énergie du méthane

Abréviation	Définition
ED	Énergie apparemment digestible dans le tractus digestif
EF	Énergie des fèces
EffPDI	Efficience d'utilisation des PDI par l'organisme
EM	Énergie métabolisable
EN ; ENL ; ENV	EN : Énergie nette ; ENL : EN pour la production de lait ; ENV : EN pour la production de viande
EU	Énergie urinaire
k ; kls ; ktg ; kmf ; km ; kpf	k : rendement d'utilisation de l'énergie métabolisable ; kls : pour l'entretien et la production de lait ; ktg : pour la reconstitution/mobilisation des réserves ; kmf : pour l'entretien et le gain (animaux en croissance et engraissement) ; km : pour l'entretien (animaux en croissance et engraissement) ; kpf : pour le gain de protéines et de lipides (animaux en croissance et engraissement)
LysDI	Lysine digestible dans l'intestin
MAF	Matières azotées fermentescibles dans le rumen
MAMic_duo	Matières azotées microbiennes au duodénum
MAT	Matières azotées totales
MetDI	Méthionine digestible dans l'intestin
Mg <sub>abs</sub>	Magnésium absorbable
MO	Matière organique
MOD	Matière organique apparemment digestible dans le tractus digestif
MOD_int	Matière organique apparemment digestible dans les intestins
MOF	Matière organique fermentescible dans le rumen
MP	Matières protéiques (dans le lait)
MS	Matière sèche
NDF	Parois végétales ( <i>Neutral Detergent Fibre</i> )
NDFND	NDF non digestible
NI, NIref	NI : Niveau d'ingestion ; NIref : Niveau d'ingestion de référence
P <sub>asb</sub>	Phosphore absorbable
PCO	Proportion de concentré
PDI ; PDIA ; PDIM	PDI : Protéines digestibles dans l'intestin ; PDIA : PDI d'origine alimentaire ; PDIM : PDI d'origine microbienne
PDIE ; PDIN	PDIE : PDI permis par l'énergie disponible dans le rumen ; PDIN : PDI permis par l'N dégradable dans le rumen (ces deux critères sont obsolètes dans INRA 2018)
PL ; PL <sub>Pot</sub>	PL : Production laitière ; PL <sub>Pot</sub> : Production laitière potentielle
PF	Produits de fermentation des ensilages
PIA	Protéines alimentaires entrant dans l'intestin
PV	Poids vif
TB	Taux butyreux
TP	Taux protéique
UE ; UEM ; UEL ; UEB	UE : Unité d'encombrement ; UEM : UE mouton ; UEL : UE lait (vaches et chèvres) ; UEB : UE bovin (en croissance ou allaitant)
UF ; UFL ; UFV	UF : Unité fourragère ; UFL : UF pour la production de lait ; UFV : UF pour la production de viande

## Références

- Binggeli, S., Lapiere, H., Lemosquet, S., Ouellet, D., & Pellerin, D. (2022). Comparison of feed evaluation models on predictions of milk protein yield on Québec commercial dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 105(5), 3997-4015. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21182>
- CVB. (2012). *CVB feed table 2011: Chemical compositions and nutritional values of feed materials*. Centraal Veevoederbureau, Product Board Animal Feed. <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:002180135>
- Daniel, J. B., Van Laar, H., Dijkstra, J., & Sauvant, D. (2020). Evaluation of predicted ration nutritional values by NRC (2001) and INRA (2018) feed evaluation systems, and implications for the prediction of milk response. *Journal of Dairy Science*, 103(12), 11268-11284. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18286>
- Demarquilly, C., Chenost, M., & Giger, S. (1995). Pertes fécales et digestibilité des aliments et des rations. In R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M. H. Farce, & M. Journet (Coords.), *Nutrition des ruminants domestiques* (pp. 501-648). INRA Éditions. <https://hal.inrae.fr/hal-02850450v1>
- Fox, D. G., Tedeschi, L. O., Tylutki, T. P., Russell, J. B., Van Amburgh, M. E., Chase, L. E., Pell, A. N., & Overton, T. R. (2004). The Cornell Net Carbohydrate and Protein System model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Animal Feed Science and Technology*, 112(1-4), 29-78. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2003.10.006>
- INRA. (1978). *Alimentation des ruminants*. INRA Publications.
- INRA. (1988). *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA Éditions.
- INRA. (1989). *Ruminant nutrition: recommended allowances & feed tables*. John Libbey Eurotext.
- INRA. (2007). *Alimentation des bovins, ovins et caprins: Besoins des animaux – Valeurs des aliments – Tables INRA 2007*. Éditions Quæ.
- INRA. (2010). *Alimentation des bovins, ovins et caprins: Besoins des animaux – Valeurs des aliments – Tables INRA 2007 (mise à jour 2010)*. Éditions Quæ.
- INRA. (2018a). *INRA feeding system for ruminants*. Wageningen Academic Publishers.
- INRA. (2018b). *Alimentation des ruminants: Apports nutritionnels – Besoins et réponses des animaux – Rationnement – Tables des valeurs des aliments*. Éditions Quæ.
- Lapiere, H., Larsen, M., Sauvant, D., Van Amburgh, M. E., & Van Duinkerken, G. (2018). Converting nutritional knowledge into feeding practices: A case study comparing different protein feeding systems for dairy cows. *Animal*, 12(Suppl. 2), s457-s466. <https://doi.org/10.1017/S1751731118001763>
- NASEM. (2016). *Nutrient requirements of beef cattle* (8th rev. ed.). The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/19014>
- NASEM. (2021). *Nutrient requirements of dairy cattle* (8th rev. ed.). The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25806>
- Nozière, P., Baumont, R., Boudon, A., Delagarde, R., Hassoun, P., Lemosquet, S., Maxin, G., Sepchat, B., & Delaby, L. (2026). Le système d'alimentation INRA 2018 pour les ruminants. 2. Application au rationnement. *INRAE Productions Animales*, 39(2), 9809. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2026.39.2.9809>
- NRC. (2001). *Nutrient requirements of dairy cattle* (7th rev. ed.). National Academy Press. <https://doi.org/10.17226/9825>
- NRC. (2007). *Nutrient requirements of small ruminants: Sheep, goats, cervids, and new world camelids*. National Academy Press. <https://doi.org/10.17226/11654>
- Sauvant, D., & Nozière, P. (2013). La quantification des principaux phénomènes digestifs chez les ruminants: Les relations utilisées pour rénover les systèmes d'unités d'alimentation énergétique et protéique. *INRA Productions Animales*, 26(4), 327-346. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2013.26.4.3162>
- Sauvant, D., Cantalapiedra-Hijar, G., Delaby, L., Daniel, J.-B., Faverdin, P., & Nozière, P. (2015a). Actualisation des besoins protéiques des ruminants et détermination des réponses des femelles laitières aux apports de protéines digestibles dans l'intestin. *INRA Productions Animales*, 28(5), 347-368. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2015.28.5.3038>
- Sauvant, D., Ortigues-Marty, I., Giger-Reverdin, S., & Nozière, P. (2015b). *Actualisation des besoins et efficacités énergétiques des femelles laitières* [Communication]. 22e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris. <https://hal.science/hal-01356573v1>
- Thomas, C. (2004). *Feed into milk: A new applied feeding system for dairy cows*. Nottingham University Press.
- Van Duinkerken, G., Blok, M. C., Bannink, A., Cone, J. W., Dijkstra, J., Van Vuuren, A. M., & Tamminga, S. (2011). Update of the Dutch protein evaluation system for ruminants: The DVE/OEB<sub>2010</sub> system. *The Journal of Agricultural Science*, 149(3), 351-367. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000912>
- Van Es, A. J. H. (1978). Feed evaluation for ruminants. 1. The systems in use from May 1977-onwards in the Netherlands. *Livestock Production Science*, 5(4), 331-345. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(78\)90029-5](https://doi.org/10.1016/0301-6226(78)90029-5)
- Volden, H. (2011). *NorFor – The Nordic feed evaluation system* (EAAP Publication No. 130). Wageningen Academic Publishers. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-718-9>
- Zom, R. L. G., André, G., & van Vuuren, A. M. (2012). Development of a model for the prediction of feed intake by dairy cows: 1. Prediction of feed intake. *Livestock Science*, 143(1), 43-57. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.08.014>

## Résumé

L'alimentation est un enjeu stratégique pour l'éleveur, qui associe recherche de la performance zootechnique, maîtrise des coûts et de la qualité des produits, respect du bien-être animal et de l'environnement. Le système INRA 2018, basé sur les connaissances en nutrition accumulées par INRAE et dans la littérature, propose une approche du rationnement adaptée aux bovins, ovins et caprins, producteurs de lait ou de viande, à l'auge ou au pâturage. Le système repose sur plusieurs unités, communes aux valeurs des aliments et des rations d'une part, et aux besoins ou à la capacité d'ingestion des animaux d'autre part : les UF (unités fourragères) pour l'énergie, les PDI/AADI pour les protéines et acides aminés digestibles, et les UE (unités d'encombrement) pour l'ingestion. Il comprend également une estimation des apports et besoins en minéraux, vitamines et eau. Les valeurs des aliments sont déterminées à partir de leur digestibilité et de leur dégradabilité dans le rumen, qui dépendent de leur composition chimique, et d'interactions au sein de la ration. Les besoins des animaux prennent en compte les différentes fonctions physiologiques, et la capacité d'ingestion est propre à chaque catégorie d'animal. Diverses lois de réponse permettent de simuler les performances selon la ration : production de lait, croissance, rejets (CH<sub>4</sub>, azote), indicateurs de qualité des produits et de risque d'acidose. Le logiciel INRA<sup>®</sup>V5 intègre ces modèles pour résoudre des problématiques de rationnement sur le terrain. Cet article présente les bases du système en mettant l'accent sur les nouveautés intégrées en 2018. Un article compagnon présente des exemples d'élaboration multiobjectif et d'évaluation multicritère des rations pour différentes espèces et types de productions.

**Mots clés :** ingestion ; protéines ; énergie ; apports nutritionnels ; besoins ; réponses

## Abstract

### **The INRA 2018 feeding system for ruminants. 1. Conceptual foundations and specific features**

Feeding ruminants is a strategic issue for the farmer, combining the quest for zootechnical and economic performances, quality of products, respect for animal welfare and environment. The INRA 2018 system, based on nutritional knowledge accumulated by INRAE and in the literature, offers an approach to rationing, adapted to dairy and meat-producing cattle, sheep and goats, at barn or on pasture. The system is based on units common to both feed values, and animal needs or capacity: UF (forage units) for energy, PDI/AADI for protein and digestible amino acids, and UE (fill units) for intake. It also estimates mineral, vitamin and water intakes and requirements. Feed values depend on their chemical composition, digestibility and ruminal degradability, and on their interactions within the diet. Animal requirements take into account the different physiological functions, and intake capacity is specific to each animal category. Response laws enable performance to be simulated according to ration: milk production, growth, emissions (CH<sub>4</sub>, nitrogen), indices of product quality and acidosis risk. INRAration<sup>®</sup>V5 integrates these models to solve rationing problems in the field. This paper presents the basics of the system, focusing on the new features integrated in 2018. A companion paper presents examples of multi-objective resolution and multicriteria evaluation of diets for various types of ruminants and productions.

**Keywords:** Intake; Protein; Energy; Nutrient supply; Requirements; Responses

NOZIÈRE, P., BAUMONT, R., BOUDON, A., DELAGARDE, R., HASSOUN, P., LEMOSQUET, S., MAXIN, G., SEPCHAT, B., & DELABY, L. (2026). Le système d'alimentation INRA 2018 pour les ruminants. 1. Bases conceptuelles. *INRAE Productions Animales*, 39(2), 9526.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2026.39.2.9526>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>

La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI en respectant les informations figurant ci-dessus.