
Chapitre II : Métabolisme azoté

1. Les dépenses azotées de l'organisme

Les dépenses azotées constituent un indicateur essentiel du métabolisme protéique et de la performance nutritionnelle des animaux. Leur maîtrise permet d'améliorer la rentabilité, la santé et la durabilité environnementale des systèmes d'élevage.

Les dépenses azotées correspondent à la quantité d'azote éliminée par l'organisme animal sous forme de produits du métabolisme des protéines et des acides aminés. Elles traduisent la dégradation des protéines corporelles et sont un indicateur du bilan azoté, c'est-à-dire l'équilibre entre les apports et les pertes d'azote.

Dans le domaine de la nutrition animale, l'étude des dépenses azotées permet d'évaluer :

- l'efficacité de l'utilisation des protéines alimentaires,
- l'état nutritionnel de l'animal,
- la productivité (croissance, lactation, reproduction),
- les rejets azotés dans l'environnement.

Un bon équilibre azoté améliore la rentabilité et la durabilité de l'élevage.

1.1. Origine des dépenses azotées

Les **pertes d'azote** de l'organisme proviennent principalement de trois sources :

a. Les urines: la voie principale d'élimination de l'azote. L'azote urinaire est essentiellement sous forme d'urée (chez les mammifères), mais aussi d'ammoniac, créatinine, acide urique (oiseaux), et acides aminés libres.

Ces composés résultent du catabolisme des acides aminés, dont le groupe amine est transformé en ammoniac, puis en urée via le cycle de l'urée (dans le foie).

b. Les fèces: l'azote fécal provient :

- des résidus non digérés de protéines alimentaires,
- des cellules intestinales desquamées,
- et des micro-organismes intestinaux détruits.

Il reflète l'efficacité digestive des protéines.

c. Les pertes azotées insensibles : Elles regroupent les pertes mineures d'azote par la sueur, les poils et plumes, la peau et la salive.

Elles sont faibles mais constantes, représentant 5 à 10 % du total.

1.2. Le bilan azoté

Le bilan azoté (BN) exprime la différence entre l'azote ingéré et l'azote excrété.

- Si le bilan azoté est positif : l'animal retient de l'azote qui est utilisé pour la croissance, gestation, production lactée ou musculaire.
- Si le bilan azoté est nul, il y a équilibre entre synthèse et dégradation protéique → entretien.
- Si le bilan azoté est négatif cela signifie que les pertes sont supérieures aux apports. Cette situation peut être observée en cas de catabolisme accru, jeûne, stress, maladie.

1.3. Facteurs influençant les dépenses azotées

a. L'alimentation

- Qualité et quantité des protéines : les protéines digestibles et équilibrées en acides aminés réduisent les pertes urinaires.

-**Énergie alimentaire** : un apport énergétique insuffisant augmente la dégradation des protéines corporelles.

-**Nature des rations** : un excès d'azote non protéique (urée chez les ruminants) entraîne une élimination accrue d'urée.

b. L'espèce et le métabolisme

Les ruminants utilisent partiellement l'azote uréique grâce à la recyclisation de l'urée dans le rumen (via la salive), mais les monogastriques (porcs, volailles) ont des pertes plus directes car l'azote n'est pas recyclé.

c. L'état physiologique

-**Croissance** : faible dépense azotée relative (rétention élevée).

- **Gestation/lactation** : augmentation des besoins protéiques donc les pertes sont relativement réduites.

-**En cas de Jeûne, stress, maladies** on assiste à un catabolisme protéique accru donc il y aura augmentation des dépenses azotées urinaires.

1.4. Mesure des dépenses azotées

Les dépenses azotées se mesurent par bilan métabolique, en déterminant la quantité d'azote **Ingéré (via la nourriture)**, **Excrété** dans les urines et les fèces, parfois dans le lait, la sueur ou les pertes cutanées.

Les analyses utilisent généralement la méthode de **Kjeldahl** pour doser l'azote total, ou des formules de conversion :

$$\text{Protéines (g)} = \text{N} \times 6,25 \quad (\text{N: Azote})$$

Par exemple, chez une vache laitière dont la quantité d'**azote ingéré** est de **500g/jour**, et dont les pertes sont présentées par l'**azote fécal** (120g/j) + l'**azote urinaire** (250g/j) et l'**azote laitier** (100g/j), le bilan sera de **+30g/j** (rétention positive).

2. Facteurs de variation de l'utilisation de l'azote chez l'animal

L'utilisation de l'azote (N) chez l'animal est un indicateur clé de l'efficacité d'utilisation des protéines alimentaires. Les principaux facteurs de variation de l'utilisation de l'azote chez l'animal sont:

2.1. Facteurs alimentaires

a. Quantité et qualité des protéines ingérées: L'efficacité d'utilisation de l'azote diminue lorsque la ration est trop riche en protéines brutes : l'excédent est désaminé et éliminé sous forme d'urée. La qualité protéique dépend de la composition en acides aminés essentiels et de leur digestibilité. Les protéines à forte valeur biologique (soja, poisson, lait) sont mieux utilisées que les protéines végétales pauvres en lysine ou méthionine.

b. Rapport énergie/protéine: Un apport énergétique adéquat est nécessaire pour la synthèse des protéines corporelles. En cas de déficit énergétique, l'animal mobilise ses protéines pour produire de l'énergie, ce qui augmente les pertes azotées urinaires.

c. Digestibilité et synchronisation: Chez les ruminants, l'efficacité dépend de la synchronisation entre **énergie fermentescible** et **azote dégradable** dans le rumen. Un manque d'énergie limite la croissance microbienne et conduit à une perte d'ammoniac dans le rumen et excrétion accrue d'urée.

d. Forme d'azote et supplémentation: L'utilisation de protéines protégées du rumen (bypass protein) améliore l'utilisation de l'azote pour la production laitière.

Les suppléments d'acides aminés limitants (lysine, méthionine) permettent de réduire la teneur protéique globale de la ration sans affecter la production.

2.2. Facteurs physiologiques

a. Espèce et type digestif: Les ruminants possèdent une flore microbienne capable de recycler une partie de l'azote uréique permettant une meilleure utilisation globale. Les monogastriques, par contre dépendent entièrement de la qualité des protéines ingérées.

b. Âge et stade physiologique: Les jeunes animaux en croissance présentent une rétention azotée élevée. Pendant la lactation ou la ponte, une part importante de l'azote est orientée vers la production. Par ailleurs, chez l'animal adulte à l'entretien, l'efficacité diminue car le métabolisme vise au maintien plutôt qu'à la synthèse.

c. État de santé et stress: Les infections, le stress thermique ou oxydatif augmentent la dégradation protéique et réduisent la rétention azotée. Les maladies hépatiques ou rénales modifient l'excrétion d'urée et d'ammoniac.

2.3. Facteurs génétiques et zootechniques

a. Potentiel génétique: Certaines races ou lignées animales sont plus efficaces dans l'utilisation des nutriments (exemple: la vaches laitières Holstein utilise mieux les nutriments que les races locales).

La sélection génétique pour l'efficacité alimentaire améliore indirectement l'efficacité azotée.

b. Niveau de production: À haut niveau de production, les besoins azotés augmentent mais l'efficacité peut diminuer si la ration n'est pas équilibrée.

c. Conditions d'élevage: Le confort, la température, l'humidité et la densité animale influencent la dépense énergétique et donc la répartition de l'azote.

2.4. Facteurs environnementaux

a. Température ambiante: En stress thermique, la consommation diminue ce qui réduit l'apport protéique et donc la baisse de l'efficacité azotée. Lors de basses températures, la thermogenèse augmente la consommation d'énergie et entraîne une compétition entre l'énergie et la synthèse protéique.

b. Saisonnalité et disponibilité fourragère: La qualité des pâturages varie selon la saison : l'azote non protéique des fourrages jeunes est souvent mal valorisé s'il n'est pas accompagné d'énergie fermentescible.

3. Modes d'expression de l'apport azoté

L'apport azoté chez l'animal correspond à la quantité totale d'azote fournie par l'alimentation, principalement sous forme de protéines et d'azote non protéique (urée, ammoniac, peptides, acides aminés libres, etc.).

L'azote alimentaire est majoritairement contenu dans les protéines, qui sont composées d'environ **16 % d'azote**. Ainsi, la relation classique est :

$$\text{Protéines brutes (PB)} = \text{Azote total (N)} \times 6,25$$

$$100/16 = 6.25$$

Il existe plusieurs modes d'expression de l'apport azoté :

3.1. Expression en azote total ou protéines brutes (PB)

C'est la quantité totale d'azote mesurée dans un aliment, multipliée par 6,25. La méthode de Kjeldahl ou de Dumas est la plus utilisée. C'est une méthode simple, rapide, et utilisée pour les tables de composition des aliments (INRA, NRC). Cependant, elle ne renseigne pas sur la valeur biologique ni la digestibilité des protéines.

- Exemple : Un foin contenant 2,4% d'azote (N). $2,4 \times 6,25 = 15$ % de protéines brutes (PB).

3.2. Expression en protéines digestibles

Cette expression tient compte de la digestibilité réelle des protéines dans le tube digestif.

Protéines digestibles (PD) = Protéines Brutes (PB) X Coefficient de digestibilité.

Chez les monogastriques : digestibilité vraie mesurée au niveau de l'intestin grêle.

Chez les ruminants : distinction entre protéines dégradables dans le rumen (PDIN) et non dégradables (PDIE).

Dans le système INRA on distingue les PDIN et PDIE:

- PDIN : protéines digestibles dans l'intestin dépendantes de l'azote fermentescible du rumen.
- PDIE : protéines digestibles dans l'intestin dépendantes de l'énergie disponible pour les microbes.

L'apport azoté utile est le minimum entre PDIN et PDIE. Autrement dit :

-Si l'azote limite la synthèse microbienne → l'apport azoté utile = PDIN

-Si l'énergie limite → l'apport azoté utile = PDIE

Ce système permet de relier digestion ruminale, croissance microbienne, et disponibilité intestinale.

3.3. Expression en protéines métabolisables (PM ou MP)

Cette expression est utilisée dans les systèmes anglo-saxons (NRC, AFRC). Elle correspond à la quantité totale de protéines absorbées sous forme d'acides aminés au niveau de l'intestin grêle et disponibles pour le métabolisme. Il s'agit donc des acides aminés absorbés qui peuvent être utilisés pour la synthèse des protéines corporelles, du lait, de la laine, des œufs, etc.

PM = Protéines microbiennes digestibles + Protéines alimentaires non dégradées digestibles

Exprimée en g de protéines métabolisables/jour ou par kg de matière sèche ingérée (MSI), le taux de Protéines Métabolisables (PM) est l'indicateur le plus représentatif de la vraie disponibilité métabolique de l'azote.

3.4. Expression en acides aminés digestibles

Cette expression est utilisée surtout chez les monogastriques (porcs, volailles). L'apport azoté est exprimé en grammes d'acides aminés digestibles (lysine, méthionine, thréonine...). La notion clé est le profil en acides aminés essentiels, qui doit correspondre aux besoins de l'animal.

AA digestibles = AA total X coefficient de digestibilité iléale.

Cette approche permet de formuler les rations avec précision et de réduire les excès d'azote excrété.

3.5. Expression en azote non protéique (ANP)

Chez les ruminants, l'ANP représente une part importante de l'apport azoté (urée, ammoniac, peptides courts). Cet azote est utilisé par la flore ruminale pour synthétiser des protéines microbiennes, à condition que l'énergie fermentescible soit disponible. L'efficacité dépend donc du rapport énergie/azote dans le rumen.

3.6. Expression en azote métabolisable (MN ou NME)

Exprimée en g d'azote métabolisable/jour ou en % de N ingéré. Elle correspond à la quantité d'azote absorbée et utilisable pour la synthèse tissulaire, la lactation, la croissance.

Application pratique:

Exemple : Vache laitière de 600 kg produisant 25 kg de lait/jour.

Paramètre	Valeur
Matière sèche ingérée (MSI)	18 kg/j
Protéines brutes (PB)	16 %
PDIN	1 350 g/j
PDIE	1 400 g/j
Protéines métabolisables (PM)	≈ 1 300 g/j
Besoin net en protéines pour la production	1 250 g/j
Conclusion	Ration équilibrée (PDIN ≈ PDIE)

4. La supplémentation des sources azotées

L'azote est un élément essentiel de la nutrition animale car il entre dans la composition des acides aminés, des protéines, et de nombreux métabolites biologiques (enzymes, hormones, acides nucléiques). La supplémentation azotée consiste à ajouter à la ration des sources d'azote (protéiques ou non protéiques) afin de :

- couvrir les besoins en azote des animaux,
- favoriser la croissance microbienne (chez les ruminants),
- équilibrer le rapport énergie/azote,
- améliorer la production (lait, viande, œufs),
- optimiser le bilan azoté et réduire les rejets environnementaux.

Les sources de la supplémentation sont de plusieurs types et plusieurs origines:

1. Sources naturelles protéiques: englobent des protéines d'origine végétale, ou d'origine animale.

a. Protéines végétales : sont utilisés, les **Tourteaux** (soja, colza, coton, tournesol, arachide), les **Légumineuses fourragères** (luzerne, trèfle, vesce, féverole), les **Céréales enrichies** : maïs, orge, avoine (faibles en lysine → souvent supplémentées). Ces suppléments présentent l'avantage d'avoir une bonne digestibilité, un apport équilibré en acides aminés, et permettent une valorisation des sous-produits agricoles. Leurs inconvénients majeurs sont le coût élevé (tourteau de soja importé), et la présence possible de facteurs antinutritionnels (tanins, facteurs trypsiques).



Luzerne



Trèfle



Vesce



Féverole

Figure : légumineuses fourragères.

b. Protéines animales

L'utilisation de ce type de protéines est de plus en plus réglementée. Peuvent être utilisés, les farines de poisson, les farines de sang ou de plumes hydrolysées (riches en acides aminés essentiels).

2. Sources d'azote non protéique (ANP)

Cette pratique est spécifique aux ruminants car seuls leurs microorganismes ruminiaux peuvent synthétiser des acides aminés à partir de l'ammoniac.

a. Urée : $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$

L'urée libère de l'ammoniac dans le rumen par hydrolyse. Elle est utilisée à faible dose ($\leq 1\%$ de la matière sèche de la ration) pour éviter la toxicité ammoniacale.

Pour que la pratique de la supplémentation en urée soit efficace, certaines conditions sont nécessaires :

- Disponibilité simultanée d'énergie fermentescible (amidon, sucres).

- Mélange homogène dans la ration.
- Adaptation progressive de la flore.

b. Autres ANP

- Biuret, cyanurate, formaldéhyde-urée : sources d'azote à libération lente.
- Ammoniac anhydre (traitement des pailles) : améliore la teneur en azote et la digestibilité des fourrages pauvres.

3. Supplémentation en acides aminés libres (monogastriques)

Cette pratique est utilisée principalement chez les porcs et volailles, dont la flore digestive ne recycle pas l'azote.

-Acides aminés limitants :

Les acides aminés les plus utilisés sont la **Lysine** qui stimule la croissance musculaire, la **Méthionine** qui a un effet sur les plumes, la kératine, et le métabolisme lipidique. D'autres acides aminés sont également concernés : la Thréonine, le tryptophane, la valine, et l'isoleucine qui agissent sur les fonctions immunitaires et la synthèse protéique.

Parmi les avantages de cette supplémentation on peut citer :

- La réduction de la teneur protéique globale de la ration.
- Une meilleure efficacité azotée.
- La réduction des rejets d'azote dans l'environnement.

Il est à noter que la pratique de la supplémentation n'est pas sans risques. Certaines précautions sont à considérer :

a. Excès d'urée chez les ruminants : une libération rapide d'ammoniac peut entraîner une toxicité aiguë chez l'animal, se traduisant par des tremblements, une salivation, et même la mort. Ces troubles peuvent être évités par une adaptation progressive de l'animal, une ration équilibrée en énergie et une bonne homogénéité du mélange.

b. Supplémentation déséquilibrée : un excès d'un acide aminé peut inhiber l'absorption d'un autre. Aussi, un rapport inadapté entre **énergie/azote** réduit l'efficacité microbienne.

c. Aspect environnemental : dans le cas de supplémentation excessive, cela se traduit par des rejets urinaires élevés conduisant à une pollution (NH_3 , N_2O , nitrates) élevée.

La supplémentation des sources azotées vise à équilibrer les apports protéiques pour répondre aux besoins de l'animal tout en améliorant l'efficacité d'utilisation de l'azote.

5. Système PDI_ INRA

L'évaluation de la valeur protéique des aliments pour ruminants est essentielle pour assurer un bon équilibre azoté, optimiser la production et réduire les rejets d'azote.

Le système PDI (Protéines Digestibles dans l'Intestin), élaboré par l'INRA dans les années 1980 puis révisé (INRA, 2018), vise à :

- Décrire la fourniture d'acides aminés par les aliments,
- Estimer la protéine réellement utilisable par l'animal,
- Relier la nutrition azotée à la nutrition énergétique.

Le système PDI a **pour but** de quantifier la quantité de protéines digestibles réellement disponibles dans l'intestin grêle après la digestion ruminale. Il repose sur le principe suivant :

Chez les ruminants, les protéines alimentaires sont partiellement dégradées dans le rumen par les microbes. Ces microbes synthétisent leurs propres protéines (protéines microbiennes). Une partie des protéines alimentaires échappe à la dégradation ruminale (protéines by-pass). **La somme des protéines digestibles issues de ces deux origines constitue les PDI.**

5.1. Composantes du système PDI

A. Les deux sources principales de protéines digestibles :

Le système distingue deux types de protéines digestibles dans l'intestin (PDI) :

-**PDIA** (Protéines Digestibles dans l'Intestin issues des protéines Alimentaires) : c'est la partie des protéines alimentaires non dégradées dans le rumen, mais digestibles dans l'intestin. Elle dépend du taux de dégradation ruminale et de la digestibilité intestinale.

-**PDIM** (Protéines Digestibles issues des Microbes) : c'est la partie des protéines synthétisées par les microbes du rumen à partir de l'azote (NH_3), et de l'énergie fermentescible. Ces protéines représentent la principale source d'acides aminés pour le ruminant.

B. Limitations possibles de la synthèse microbienne

La production microbienne dépend essentiellement de l'**azote disponible** (ammoniac, peptides, acides aminés), et de l'énergie fermentescible (sucres, amidons, cellulose).

Ainsi, on définit :

-**PDIN** : PDI lorsque la synthèse microbienne est limitée par l'azote.

-**PDIE** : PDI lorsque la synthèse microbienne est limitée par l'énergie.

L'animal utilise la valeur **la plus petite** des deux (PDIN ou PDIE) comme valeur limitante. Dans le tableau sont résumés les composantes détaillées du système.

Tableau : composantes détaillées du système PDI.

Symbole	Signification	Origine principale
PDIA	Protéines alimentaires non dégradées mais digestibles	Aliments by-pass
PDIMN	Protéines microbiennes digestibles issues de la disponibilité en azote	Flore microbienne
PDIME	Protéines microbiennes digestibles issues de la disponibilité énergétique	Flore microbienne
PDIN	PDIA + PDIMN	Système azoté
PDIE	PDIA + PDIME	Système énergétique
PDI réel	min(PDIN, PDIE)	Ration globale

Les besoins en PDI comprennent deux types de besoins INRA (2018):

- Les **Besoin d'entretien** (PDI_ent) : proportionnelle au poids métabolique.
- Les **Besoin de production** (PDI_prod) : proportionnelle à la production (lait, croissance).

Exemple : Les besoins d'une vache laitière de 600 kg produisant 30 L/jour sont d'environ $\approx$ 1600-1700 g PDI/j.

Les besoins d'une génisse en croissance sont d'environ $\approx$ 700-900 g PDI/j selon le gain de poids.

5.2. Relations entre systèmes azoté et énergétique

Le système PDI est étroitement lié au système énergétique (UFL/UFV) :

- Si l'énergie manque, la synthèse microbienne **diminue**. Donc les **PDIE** < PDIN.
- Si l'azote manque, la synthèse microbienne est **limitée** également. Donc, les PDIN < PDIE.

L'objectif de la formulation d'une ration est donc d'atteindre un équilibre entre l'azote et l'énergie de la ration pour maximiser la synthèse protéique microbienne dans le rumen.

Le système PDI de l'INRA constitue un outil essentiel pour la formulation rationnelle des régimes alimentaires des ruminants. Il relie la nutrition azotée à la nutrition énergétique, permettant d'optimiser la production, d'améliorer l'efficacité de l'azote, et de réduire les pertes environnementales.

En pratique, l'utilisation pratique du système PDI passe par les étapes suivantes:

1. Identifier les besoins en PDI de l'animal.
2. Calculer les PDIN et PDIE de chaque aliment.
3. Formuler la ration pour équilibrer PDIN = PDIE.
4. Vérifier la couverture des besoins énergétiques et minéraux.

Exemples :

- Foin pauvre → faible PDIN, bonne PDIE → besoin d'une source azotée (urée, tourteau).
- Ration riche en concentrés → forte PDIN, faible PDIE → ajout de fibres ou fourrages fermentescibles.