



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Institut National Polytechnique de Lorraine

Ecole Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires

Laboratoire de Sciences Animales, USC INRA 12340

Ecole Doctorale

Sciences et Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits et Environnement

Thèse

présentée et soutenue publiquement en vue de l'obtention du grade de

Docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine

Spécialité : Sciences Agronomiques

par **Valérie MONTEILS**

le 18 décembre 2002

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

**Distribution de l'azote entre le lait, les fèces et l'urine chez la vache laitière
alimentée avec des rations déficitaires en azote fermentescible**

Membres du jury :



D 136 031211 0

F. LAURENT, Professeur, ENSAIA-INPL, Nancy

R. DACCORD, Directeur de recherche, Station fédérale de Possieux (Suisse)

M. DOREAU, Directeur de recherche, INRA, Clermont-Ferrand

G. BLANCHART, Professeur, UHP, IUT de Nancy-Brabois

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Institut National Polytechnique de Lorraine

[1] 2002 MONTEILS, V.

Ecole Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires

Laboratoire de Sciences Animales, USC INRA 12340

Ecole Doctorale

Sciences et Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits et Environnement

Thèse

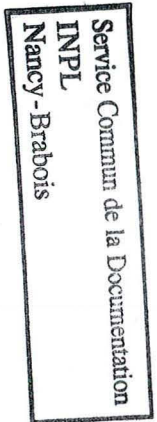
présentée et soutenue publiquement en vue de l'obtention du grade de

Docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine

Spécialité : Sciences Agronomiques

par **Valérie MONTEILS**

le 18 décembre 2002



**Distribution de l'azote entre le lait, les fèces et l'urine chez la vache laitière
alimentée avec des rations déficitaires en azote fermentescible**

Membres du jury :

F. LAURENT, Professeur, ENSAIA-INPL, Nancy

Président

R. DACCORD, Directeur de recherche, Station fédérale de Possieux (Suisse)

Rapporteur

M. DOREAU, Directeur de recherche, INRA, Clermont-Ferrand

Rapporteur

G. BLANCHART, Professeur, UHP, IUT de Nancy-Brabois

Examineur

Avant propos

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire Sciences Animales de l'ENSAIA à l'INPL.

Je tiens à remercier Monsieur François LAURENT de m'avoir accueillie du laboratoire ainsi que pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux et à la rédaction de ce document.

Merci à Monsieur Gérard BLANCHART pour son encadrement au cours de ces trois années ainsi que pour les discussions que nous avons pu avoir au cours de la rédaction.

Je remercie également les membres extérieurs du jury d'avoir accepté de juger ce travail :

Monsieur Roger DACCORD, Directeur de recherche à la Station Fédérale de recherches en
Production Animale de Posieux (Suisse) et

Monsieur Michel DOREAU, Directeur de recherche à l'Unité de recherches sur les herbivores
au Centre INRA de Clermont-Ferrand

Un grand merci à Stefan JURJANZ pour sa grande disponibilité tout au long de ces quatre années ainsi que pour ses conseils très avisés.

Je remercie également Claire et Catherine pour m'avoir suppléée lors des essais de longue durée, souvent à des heures peu convoitées.

Mes remerciements vont également à François DUGNY et Patrice REGNIERE sans qui les essais n'auraient pas pu avoir lieu.

Que les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, en acte ou en réflexion, à l'avancé de ce travail et à son bon déroulement soient remerciées en ces quelques mots brefs mais sincères.

RESUME

La variation de la distribution d'azote dans les compartiments lait, urine et fèces a été étudiée chez la vache laitière. Une modélisation avec les données bibliographiques démontre l'impact déterminant de la teneur en MAT de la ration sur la prédiction des quantités sécrétées et rejetées. Les rations utilisées lors des expérimentations sont conçues avec un déficit en azote fermentescible (dPDI $\sim 10\text{g/kg MS}$) pour optimiser la valorisation dans le lait par un recyclage accru.

Un premier essai utilisant des teneurs entre 13 et 16% de MAT dans la ration confirme que les quantités exportées augmentent avec la teneur en MAT. La valorisation dans le lait de l'azote ingéré ou de l'azote digéré diminue alors que la digestibilité apparente de l'azote et le rapport azote urinaire / azote apporté augmentent.

Un deuxième essai montre que, pour des rations à 13 et 14% de MAT, la réponse de l'exportation de l'azote dans le lait ne dépend pas du stade de lactation (semaine de lactation 3 à 18), les facteurs stade et teneur en MAT étant indépendants.

Enfin, un troisième essai a été mené pour étudier l'effet d'un apport supplémentaire d'énergie ($+0,05\text{ UFL/kg MS}$) sur la distribution de l'azote pour deux niveaux azotés donnés (12 et 14% MAT). Cet apport d'énergie génère une augmentation d'ingestion d'azote et une augmentation de sa digestibilité apparente. Il permet de maintenir la part de l'azote apporté dans le lait pour les deux niveaux azotés. Même si l'excrétion urinaire d'azote représente des parts similaires avec les deux apports énergétiques, il y a une augmentation de la proportion d'azote uréique par l'apport supplémentaire d'énergie pour la ration 14% MAT. Pour ce régime, l'augmentation d'ingestion d'azote, suite à un apport supplémentaire d'énergie, n'est pas entièrement compensée.

La valorisation systématiquement supérieure dans le lait de l'azote apporté par rapport aux valeurs moyennes des données de la littérature, pour une gamme proche de teneur en MAT de la ration, peut s'expliquer par une mise à disposition supplémentaire d'azote au métabolisme par le recyclage. Les excréments urinaire et fécale d'azote répondent moins fortement à ce déficit d'azote fermentescible.

Mots clefs: Azote, Valorisation, Distribution, Vache laitière

SUMMARY

The variation of the nitrogen distribution in the output compartments milk, urine and faeces has been studied in dairy cows. A model carried out by bibliographic analysis shows the central role of the crude protein level of diets on predictions of nitrogen recovery in milk or its losses in urine or faeces. All experimental diets are made using a systematically deficit of rumen fermentable nitrogen (dPDI ~10 g/kg DM) to maximise utilisation in milk by favouring nitrogen recycling.

The first trial confirmed that all N outputs increased with the CP level, running from 13 to 16% of the DM. The recovery rate in milk of nitrogen intake or digested nitrogen decreased whereas digestibility and relative urinary losses increased.

A second trial showed for two CP levels (13% and 14%), that its determination on the nitrogen recovery in milk was independent of lactation state as this last factor and CP level affected separately milk nitrogen.

The third trial studied the effect of an additional energy supply for two given CP levels in the diet (12% and 14%) on nitrogen outputs. This supply enhanced an increased nitrogen intake and apparent digestibility. No improvement by the supplementary energy of the recovery rate of fed nitrogen in milk has been noted for both CP levels. Even if urinary losses were similar between both energy supplies at both CP levels, at the higher level (14% CP) feed nitrogen loosed in urine as urea nitrogen is higher with the supplementary energy. In this case, the increased nitrogen intake are not completely buffered by a more efficient metabolic conversion into milk.

For a given range of CP levels, the metabolic utilisation of feed nitrogen in milk in our trials was systematically higher than the bibliographic values in average. As recycling has been stimulated in all diets by a systematic deficit of fermentable nitrogen, this result could be due to an underestimated metabolic nitrogen supply. The nitrogen recovered in urine and faeces was less sensitively affected by this supplementary nitrogen source.

Key words: nitrogen, utilization, distribution, dairy cow

Liste des publications

Revue internationale avec comité de lecture

V. Monteils, S. Jurjanz, O. Colin-Schollen, G. Blanchart, F. Laurent. 2002

Kinetics of ruminal degradation of wheat and potato starches in total mixed rations.

Journal of Animal Science 2002. 80: 235-241.

V. Monteils, S. Jurjanz, G. Blanchart, F. Laurent. 2003

Nitrogen utilisation by dairy cows fed diets varying in crude protein level with a deficit of ruminal fermentable nitrogen.

Reproduction Nutrition Développement, sous presse.

S. Jurjanz, V. Monteils, P. Juaneda, F. Laurent. 2002

Variations of Trans-octadecenoic acid in milk fat by starch fed to dairy cows.

British Journal of Nutrition, Soumis.

Communications avec actes

S. Jurjanz, V. Monteils, M. Ben Romdhane. 2002

Fiabilité de l'estimation de la digestibilité apparente chez la vache laitière par des marqueurs naturels.

9^{ème} Rencontres Recherches Ruminants, 338, 4-5 Décembre 2002, Paris.

V. Monteils, S. Jurjanz, G. Blanchart, F. Laurent. 2002

Valorisation of feed nitrogen by dairy cows at the beginning of lactation.

19th General meeting of the European Grassland Federation, 582-583, 27-30 Mai 2002, La Rochelle.

V. Monteils, S. Jurjanz, G. Blanchart, F. Laurent. 2001

Estimation de la quantité d'azote urinaire excrétée par des vaches laitières en production.

8^{ème} Rencontres Recherches Ruminants, 294, 5-6 Décembre 2001, Paris.

V. Monteils, S. Jurjanz, G. Blanchart, F. Laurent. 2000

Utilisation de l'azote par des vaches laitières en fonction de la teneur en MAT de la ration complète.

7^{ème} Rencontres Recherches Ruminants, 208, 6-7 Décembre 2000, Paris.

Sommaire

Liste des abréviations	1
Liste des tableaux	4
Liste des figures	7
Liste des annexes	10
Introduction générale	11
Synthèse bibliographique	13-49
I. Facteurs de variation de l'excrétion fécale d'azote	13
I.1. Digestibilité de l'azote	13
I.1.1. Digestibilité réelle	13
I.1.2. Digestibilité apparente	13
I.2. Facteurs de variation de la digestibilité	14
I.2.1. Caractéristiques de la ration	14
I.2.1.1. Valeurs azotée et énergétique de la ration	14
I.2.1.2. Nature des sources azotées, mode de conservation et traitements	15
I.2.2. Niveau d'ingestion et couverture des besoins	16
I.2.3. Dégradation ruminale	17
I.2.3.1. Protéolyse	17
I.2.3.2. Protéosynthèse	18
I.2.4. Digestion post-ruminale	20
I.2.4.1. Digestion dans la caillette	20
I.2.4.2. Digestion intestinale	20
I.2.5. Azote fécal endogène	21
I.3. Conclusion : éléments d'une loi de réponse	23
II. Facteurs de variation de l'excrétion urinaire d'azote	24
II.1. Excrétion urinaire	24
II.2. Facteurs de variation	25
II.2.1. Apports azotés (teneur et nature des sources protéiques)	25
II.2.2. Quantité d'azote ingéré et taux de couverture des besoins azotés	26
II.2.3. Apports énergétiques	26
II.2.4. Absorption de l'ammoniac	27
II.2.5. Synthèse hépatique d'urée	28
II.2.6. Recyclage d'azote	29
II.2.6.1. Recyclage salivaire	30
II.2.6.2. Recyclage ruminal	30
II.2.6.3. Recyclage total au niveau du rumen	31
II.2.6.4. Recyclage intestinal	31
II.2.6.5. Intensité du recyclage	31
II.2.7. Urémie	32
II.3. Conclusion : éléments d'une loi de réponse	32

III. Facteurs de variation de l'azote du lait	33
III.1. L'azote du lait	33
III.2. Facteurs de variation	34
III.2.1. Apports azotés alimentaires	34
III.2.1.1. Teneur en MAT de la ration, ingestion d'azote et taux de couverture des besoins azotés	34
III.2.1.2. Dégradabilité ruminale et digestibilité	36
III.2.2. Nature des AA circulants	38
III.2.2.1. Taux d'extraction	38
III.2.2.2. Sécrétion dans le lait	39
III.2.3. Apports énergétiques	40
III.3. Conclusion : éléments d'une loi de réponse	40
IV. Modèles de prédiction de la distribution de l'azote	42
IV.1. Présentation des modèles	42
IV.2. Conclusion	47
 Conclusion de la synthèse bibliographique	 48
 Problématique	 50
 Matériel et méthodes	 52-61
I. Présentation générale des essais	52
I.1. Animaux	52
I.2. Allotement	52
I.3. Alimentation	53
I.4. Mesures et prélèvements	53
I.4.1. Ingestions et aliments	54
I.4.2. Production laitière et composition du lait	54
I.4.3. Digestibilité apparente	55
I.4.4. Prélèvements sanguins	55
I.4.5. Fermentation ruminale	56
I.4.6. Dégradation ruminale	57
I.4.7. Excrétion urinaire	57
I.4.8. Performances zootechniques	58
II. Calculs	58
II.1. Digestibilité apparente de la MS et de l'azote	58
II.2. Dégradabilité ruminale	58
II.3. Taux de couverture des besoins	59
II.3.1. Taux de couverture azoté	59
II.3.2. Taux de couverture énergétique	60
III. Traitements statistiques	60

Expérimentation A

62-74

« Distribution de l'azote entre le lait, les fèces et l'urine selon le niveau de MAT de la ration »

I. Objectifs	62
II. Résultats	62
II.1. Production et composition du lait	62
II.1.1 Production	62
II.1.2. Composition du lait (Taux, Quantité de matière)	63
II.1.3. Composition azotée	63
II.2. Excrétion fécale	64
II.3. Excrétion urinaire	64
II.4. Ingestion et digestibilité apparente de l'azote	64
II.5. Digestion ruminale des rations	65
II.6. Distribution de l'azote ingéré	66
II.7. Distribution de l'azote digéré	67
II.8. Taux de couverture, Urémie	67
III. Discussion	68
IV. Conclusion	74

Expérimentation B

75-83

« Effet du stade de lactation sur la sécrétion d'azote dans le lait en interaction avec le niveau de MAT de la ration »

I. Objectifs	75
II. Résultats	76
II.1. Production et composition du lait	76
II.1.1. Production	76
II.1.2. Composition du lait (Taux, Quantité de matière)	76
II.1.3. Composition azotée	77
II.2. Excrétion fécale	78
II.3. Ingestion et digestibilité apparente de l'azote	78
II.4. Efficacité de l'exportation dans le lait de l'azote ingéré	79
II.5 Efficacité de la sécrétion dans le lait de l'azote digéré	80
II.6. Paramètres sanguins	80
II.7. Poids vif	80
II.8. Taux de couverture	81
III. Discussion	82
IV. Conclusion	83

**« Effet de l'énergie, pour un niveau de MAT donné de la ration,
sur la distribution de l'azote entre le lait, les fèces et l'urine »**

I. Objectifs	84
II. Résultats	85
II.1. Production et composition du lait	85
II.1.1. Production	85
II.1.2. Composition du lait	85
II.1.3. Composition azotée	85
II.2. Excrétion fécale d'azote	86
II.3. Excrétion urinaire	86
II.4. Ingestion et digestibilité apparente de l'azote	87
II.5. Digestion ruminale des rations	87
II.6. Distribution de l'azote ingéré	89
II.7. Distribution de l'azote digéré	90
II.8. Paramètres sanguins	90
II.9. Taux de couverture des besoins	91
III. Discussion	91
IV. Conclusions	97
 Discussion générale	 98
 Conclusions générales et perspectives	 104
 Références bibliographiques	 106
 Annexes	 114

Liste des abréviations

2N : 2 Normal

AA : Acide Aminé

AADI : Acide Aminé Digestible dans l'Intestin

AAE : Acide Aminé Essentiel

AANE : Acide Aminé Non Essentiel

AAT/PBV : Acides aminés totaux / Balance protéique ruminale

AGNE : Acide Gras Non Estérifié

AGV : Acide Gras Volatil

Ala : Alanine

ANP : Azote Non Protéique

Arg : Arginine

Asn : Asparagine

Asp : Aspartate

Ca : Calcium

CaCO₃ : Carbonate de Calcium

Cit : Citruline

Co : Cobalt

Cu : Cuivre

Cys : Cystéine

DIP/UIP : Protéines dégradables dans l'intestin / Protéines non dégradables dans l'intestin

dL : déciLitre

DT : Dégradabilité théorique

DUP/ERDP : Protéines non dégradables dans l'intestin / Protéines réellement dégradées dans le rumen

DVE/OEB : Protéines totales dégradées dans l'intestin / Différence entre les protéines dégradées dans l'intestin permises par l'énergie ou l'azote fermentescible

E : Energie

E. Herbe : Ensilage d'Herbe

E. Maïs : Ensilage de Maïs

ETR : Ecart-Type Résiduel

Gln : Glutamine

Glu : Glutamate
Gly : Glycine
GMQ : Gain Moyen Quotidien
HCl : Acide Chlorhydrique
His : Histidine
Ile : Isoleucine
j : Jour
kg : kilogramme
Leu : Leucine
Lys : Lysine
M : Molaire
MAD : Matière Azotée Digestible
MAND : Matière Azotée Non Digestible
MAT : Matière Azotée Totale
Met : Méthionine
Mg : Magnésium
MJ : Mégajoules
Mn : Manganèse
MO : Matière Organique
MOF : Matière Organique Fermentescible
MS : Matière Sèche
MSI : Matière Sèche Ingérée
N : Azote
n : Nombre d'individu
ND : Non Déterminé
NDF : Fibres insolubles dans un détergent neutre
NH₃ : Ammoniac
NH⁴⁺ : Ammonium
NS : Non Significatif
OH-Pro : Hydroxy-Proline
Orn : Ornithine
P : Phosphore
PDI : Protéines Digestibles dans l'Intestin

PDIA : Protéines Digestibles dans l'Intestin d'origine Alimentaire

PDIE : Protéines Digestibles dans l'Intestin quand l'énergie fermentescible au niveau ruminal est limitante

PDIM : Protéines Digestibles dans l'Intestin d'origine Microbienne

PDIN : Protéines Digestibles dans l'intestin quand l'azote fermentescible au niveau ruminal est limitant

Phe : Phenylalanine

Pro : Proline

PV : Poids Vif

r² : coefficient de détermination

RUP : Protéine peu dégradable dans le Rumen

S : Soufre

Se : Sélénium

Ser : Sérine

T. Soja : Tourteau de Soja

Tau : Taurine

TB : Taux Butyreux

Thr : Thréonine

TP : Taux Protéique

Trp : Tryptophane

TUL : Taux d'Urée du lait

Tyr : Tyrosine

UFL : Unité Fourragère Lait

Val : Valine

Zn : Zinc

Liste des tableaux

- Tableau 1 :** Excrétion azote fécale - Récapitulatif des conditions expérimentales des essais de la littérature
- Tableau 2 :** Effet des apports en sucres sur les activités protéolytiques individuelles des bactéries du rumen
- Tableau 3 :** Hydrolyse intestinale des peptides selon leur composition chez les ruminants
- Tableau 4 :** Excrétion azotée urinaire - Récapitulatif des conditions expérimentales des essais de la littérature
- Tableau 5 :** Composition de l'azote non protéique du lait de vache
- Tableau 6 :** Azote du lait - Récapitulatif des conditions expérimentales pour les différents essais de la littérature
- Tableau 7 :** Recommandations des apports en AADI pour les vaches laitières
- Tableau 8 :** Taux d'extraction des AA du sang artériel par la glande mammaire dans une situation témoin de différents auteurs
- Tableau 9 :** Evolution du taux d'extraction des AA du sang artériel par la glande mammaire en fonction du niveau d'apport
- Tableau 10 :** Evolution du rapport absorption des acides aminés du sang artériel / sécrétion dans le lait, en fonction du niveau azoté de la ration
- Tableau 11 :** Caractéristiques des données utilisées pour la formulation des modèles prédictifs de la distribution de l'azote chez la vache laitière
- Tableau 12 :** Prédiction de la distribution de l'azote selon le modèle de Spanghero et Kowalski (1997)
- Tableau 13 :** Coefficients de la régression linéaire multiple des équations de prédiction de l'excrétion azotée selon le modèle de Wilkerson *et al.* (1997)
- Tableau 14 :** Prédiction de la distribution de l'azote selon le modèle de Jonker *et al.* (1998)
- Tableau 15 :** Equation de prédiction des flux d'azote selon le modèle de Kebreab *et al.* (2002)
- Tableau 16 :** Valeurs des paramètres du modèle de Kebreab *et al.* (2002)
- Tableau 17 :** Présentation du dispositif expérimental de chaque essai
- Tableau 18 :** Caractéristiques des animaux au début de l'essai
- Tableau 19 :** Composition et valeur nutritive des rations
- Tableau 20 :** Dosages effectués sur les échantillons de plasma

- Tableau 21** : Production et composition du lait pour les différents niveaux azotés des rations (Expérimentation A)
- Tableau 22** : Fractions azotées du lait (en teneur et en quantité) pour les différents niveaux azotés des rations (Expérimentation A)
- Tableau 23** : Excrétion azotée fécale pour les différents traitements (Expérimentation A)
- Tableau 24** : Excrétion azotée urinaire (en teneur et en quantité) pour les différents traitements (Expérimentation A)
- Tableau 25** : Ingestion de matière sèche, d'azote et d'énergie pour les différents traitements (Expérimentation A)
- Tableau 26** : Paramètres de dégradation ruminale des rations reconstituées selon le modèle d'Ørskov et Mc Donald (1979) (Expérimentation A)
- Tableau 27** : Profil fermentaire au cours de la digestion des trois rations (Expérimentation A)
- Tableau 28** : Distribution de l'azote ingéré dans le lait, l'urine et les fèces pour les trois traitements (Expérimentation A)
- Tableau 29** : Distribution de l'azote digéré dans le lait et ses fractions, et dans l'urine pour les trois traitements (Expérimentation A)
- Tableau 30** : Taux de couverture des besoins azotés en énergétiques et teneur en urée plasmatique pour les trois traitements (Expérimentation A)
- Tableau 31** : Evolutions des quantités d'azote ingéré, digéré et contenu dans les différents compartiments étudiés pour les trois traitements (Expérimentation A)
- Tableau 32** : Compromis entre la valorisation de l'azote dans les protéines du lait, l'excrétion et la production laitière (Expérimentation A)
- Tableau 33** : Composition azotée du lait en fonction du stade de lactation et du niveau de MAT de la ration (Expérimentation B)
- Tableau 34** : Quantité journalière d'azote exporté dans le lait en fonction du stade de lactation et du niveau de MAT de la ration (Expérimentation B)
- Tableau 35** : Evolution de l'excrétion fécale d'azote en fonction du stade de lactation et du niveau de MAT (g/j) (Expérimentation B)
- Tableau 36** : Variations du gain moyen quotidien des vaches au cours de l'essai en fonction du niveau de MAT de la ration (g/j) (Expérimentation B)
- Tableau 37** : Données bibliographiques concernant la distribution de l'azote dans le lait en fonction du stade de lactation (Expérimentation B)

- Tableau 38** : Production et composition du lait avec les différentes rations (Expérimentation C)
- Tableau 39** : Fractions azotées du lait en teneurs et en quantités sécrétées en fonction des différents traitements (Expérimentation C)
- Tableau 40** : Excrétion fécale d'azote et digestibilité pour les différents traitements (Expérimentation C)
- Tableau 41** : Excrétion urinaire d'azote (Expérimentation C)
- Tableau 42** : Ingestion de matière sèche, d'azote et d'énergie pour les différents traitements (Expérimentation C)
- Tableau 43** : Paramètres de dégradation ruminale des rations selon le modèle d'Ørskov et Mc Donald (1979) (Expérimentation C)
- Tableau 44** : Profil fermentaire dans le rumen selon la nature des rations (Expérimentation C)
- Tableau 45** : Distribution de l'azote ingéré dans le lait, l'urine et les fèces (Expérimentation C)
- Tableau 46** : Distribution de l'azote apparemment digéré dans le lait et l'urine (Expérimentation C)
- Tableau 47** : Evolution des teneurs plasmatiques des différents paramètres sanguins en fonction du traitement (Expérimentation C)
- Tableau 48** : Taux de couverture des besoins azotés et énergétiques des différentes rations (Expérimentation C)
- Tableau 49** : Compromis entre la valorisation de l'azote dans les protéines du lait, l'excrétion et la production laitière (Expérimentation C)
- Tableau 50** : Intensité du recyclage d'azote des différents régimes appliqués dans les expérimentations A, B et C
- Tableau 51** : Comparaisons des différents traitements en terme de compromis
- Tableau 52** : Comparaisons des prédictions des quantités d'azote produites dans le lait, les fèces et l'urine par les modèles publiés avec les mesures des expérimentations A, B et C

Liste des figures

- Figure 1 :** Digestibilité apparente de l'azote en fonction de la teneur en matière azotée de la ration d'après les données de la bibliographie
- Figure 2 :** Digestibilité apparente de l'azote en fonction de la matière sèche ingérée d'après les données de la bibliographie
- Figure 3 :** Prédiction de la digestibilité de l'azote à partir de la quantité ingérée d'azote d'après les données de la bibliographie
- Figure 4 :** Digestibilité de l'azote en fonction du niveau de couverture des besoins azotés d'après les données de la bibliographie
- Figure 5 :** Distribution de l'azote ingéré entre l'urine et les fèces d'après les données de la bibliographie
- Figure 6 :** Azote urinaire en fonction de la teneur en Matière Azotée Totale de la ration d'après les données de la bibliographie
- Figure 7 :** Azote urinaire en fonction de l'ingestion d'azote d'après les données de la bibliographie
- Figure 8 :** Azote urinaire en fonction du niveau de couverture des besoins azotés d'après les données de la bibliographie
- Figure 9 :** Cycle de l'urée dans le foie des ruminants
- Figure 10 :** Le recyclage d'urée
- Figure 11 :** Azote urinaire en fonction de l'azote uréique du plasma sanguin d'après les données de la bibliographie
- Figure 12 :** Azote sécrété dans le lait en fonction de l'azote ingéré d'après les données de la bibliographie
- Figure 13 :** Azote sécrété dans le lait en fonction du niveau de couverture des besoins en azote d'après les données de la bibliographie
- Figure 14 :** Part de l'azote digéré sécrétée dans le lait en fonction du niveau de couverture des besoins en azote d'après les données de la bibliographie
- Figure 15 :** Azote sécrété dans le lait en fonction de l'azote apparemment digéré d'après les données de la bibliographie
- Figure 16 :** Part de l'azote apparemment digéré sécrétée dans le lait en fonction de l'azote apparemment digéré d'après les données de la bibliographie
- Figure 17 :** Azoté sécrété dans le lait en fonction du rapport entre l'azote et l'énergie de la ration d'après les données de la bibliographie

- Figure 18 :** Part de l'azote ingéré sécrétée dans le lait en fonction du rapport entre l'azote et l'énergie de la ration d'après les données de la bibliographie
- Figure 19 :** Organisation des prélèvements de jus de rumen dans la journée
- Figure 20 :** Disparition *in sacco* de la matière sèche (a), de la matière organique (b) et de la matière azotée (c) des rations reconstituées (Expérimentation A)
- Figure 21 :** Comparaison de la sécrétion dans le lait de l'azote ingéré (a) et de l'azote apparemment digéré (b) de l'expérimentation A avec les données de la bibliographie
- Figure 22 :** Comparaison de l'excrétion fécale d'azote rapporté à l'azote ingéré de l'expérimentation A avec les données de la bibliographie
- Figure 23 :** Comparaison de l'excrétion d'azote dans l'urine de l'azote ingéré (a) et de l'azote apparemment digéré (b) de l'expérimentation A avec les données de la bibliographie
- Figure 24 :** Variations de la production de lait brut et de lait à 4% de matière grasse (Expérimentation B)
- Figure 25 :** Variations du taux protéique du lait et de la quantité de matière protéique produite (Expérimentation B)
- Figure 26 :** Variations du taux butyreux du lait et de la quantité de matière grasse produite (Expérimentation B)
- Figure 27 :** Variations des ingestions de matière sèche, d'azote, de PDI et d'énergie (Expérimentation B)
- Figure 28 :** Variations de la digestibilité apparente de l'azote et de la quantité d'azote digéré (Expérimentation B)
- Figure 29 :** Efficacité de l'exportation dans le lait de l'**azote ingéré** (Expérimentation B)
- Figure 30 :** Efficacité de l'exportation dans le lait de l'**azote digéré** (Expérimentation B)
- Figure 31 :** Variations des teneurs en urée (a) et en AGNE (b) du plasma (Expérimentation B)
- Figure 32 :** Evolution du poids vif des vaches (Expérimentation B)
- Figure 33 :** Variations des taux de couverture des besoins en PDIE (a), en PDIN (b) et en énergie (c) (Expérimentation B)
- Figure 34 :** Evolution de l'exportation de l'azote digéré dans les protéines du lait en fonction du stade de lactation et de la quantité d'azote digéré (Expérimentation B)

- Figure 35 :** Comparaison de la sécrétion dans le lait de l'azote ingéré (a) et de l'azote apparemment digéré (b) de l'expérimentation B avec les données de la bibliographie
- Figure 36 :** Disparition *in sacco* de la matière sèche (a), de la matière organique (b) et de la matière azotée (c) des rations reconstituées (Expérimentation C)
- Figure 37 :** Variation du pH et de la teneur en NH_3 du liquide ruminal (Expérimentation C)
- Figure 38 :** Comparaison de la sécrétion dans le lait de l'azote ingéré (a) et de l'azote apparemment digéré (b) de l'expérimentation C avec les données de la bibliographie
- Figure 39 :** Comparaison de l'excrétion d'azote dans les fèces de l'azote ingéré de l'expérimentation C avec les données de la bibliographie
- Figure 40 :** Comparaison de l'excrétion d'azote dans l'urine de l'azote ingéré (a) et de l'azote apparemment digéré (b) de l'expérimentation C avec les données de la bibliographie.
- Figure 41 :** Effets de la teneur en MAT de la ration et du rapport des teneurs en MAT et en UFL de la ration sur les parts de l'azote ingéré recueillies dans le lait, les fèces et l'urine pour les expérimentations A, B, et C
- Figure 42 :** Recyclage d'azote dans une situation de déficit d'azote fermentescible par rapport à l'énergie fermentescible de la ration
- Figure 43 :** Comparaisons des données des expérimentations A, B et C avec les prédictions des quantités d'azote produites dans le lait (a), dans les fèces (b) et dans l'urine (c), du modèle établi à partir de la bibliographie

Liste des annexes

- Annexe 1 :** Données bibliographiques de la distribution de l'azote chez la vache en fonction de la teneur en MAT de la ration - Comparaison avec les données de l'expérimentation A
- Annexe 2 :** Données bibliographiques de la distribution de l'azote chez la vache en fonction de la teneur en MAT de la ration - Comparaison avec les données de l'expérimentation B
- Annexe 3 :** Données bibliographiques de la distribution de l'azote chez la vache en fonction de la teneur en MAT de la ration - Comparaison avec les données de l'expérimentation C

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'azote correspond à un paramètre clef en alimentation de la vache laitière. En effet, les protéines, principales sources d'azote, sont l'un des composants de la ration pouvant limiter la synthèse protéique par la mamelle. Les sources d'azote de la ration représentent l'un des apports les plus coûteux. L'azote sous forme de protéines est également l'un des critères de paiement du lait qui a un fort impact en France et dans l'union européenne de manière générale. Cependant l'azote représente aussi un facteur potentiel de risque pour l'environnement s'il retourne aux surfaces cultivées ou de pâturage en quantités inadaptées.

L'azote est disponible pour l'animal sous la forme d'acides aminés issus soit des protéines alimentaires, soit des protéines microbiennes après remaniement par la flore ruminale. De nombreux auteurs ont étudié les effets de la nature des protéines alimentaires sur leur utilisation par l'animal : production et composition du lait, croissance ... Un nombre important de travaux s'est intéressé à la dégradabilité ruminale des protéines alimentaires. La littérature est également riche en études abordant les traitements technologiques des matières premières de façon à modifier l'intensité des dégradations microbiennes avec pour but de modifier la proportion des protéines alimentaires par rapport aux protéines microbiennes parmi les protéines digestibles dans l'intestin. Divers organismes de recherche ont développé des systèmes se basant sur la notion de protéines métaboliques tels que le système PDI français (Jarrige, 1988) mais aussi le système DVE/OEB néerlandais (CVB, 1990), le système AAT/PBV des pays nordiques (Madson, 1985), le système DUP/ERDP britannique (AFRC 1992 et 1993) et le système DIP/UIP américain (NRC, 1985) qui ont globalement pour objectifs d'améliorer la définition des apports alimentaires pour mieux répondre aux besoins et par conséquent d'optimiser leur utilisation. Ainsi, le système PDI permet l'attribution, pour chaque aliment, de valeurs en terme d'AA absorbés dans l'intestin grêle pour des situations de déficit en azote et en énergie des rations. Il permet en particulier l'optimisation du recyclage de l'azote sous forme d'urée par l'organisme via un déficit des apports en azote fermentescible par rapport aux apports en énergie fermentescible.

Les pratiques employées en alimentation des bovins et en particulier des vaches laitières ont beaucoup évolué entre le début des années 1980 (période à laquelle l'élevage intensif était prédominant) et les années 1990 (période de prise en considération des conséquences de l'élevage intensif sur l'environnement). Il est donc nécessaire de réaliser une synthèse bibliographique des résultats obtenus depuis 1990 sur l'utilisation de l'azote alimentaire par

les vaches laitières. La distribution de l'azote ingéré est entendue comme la répartition relative de l'azote ingéré c'est à dire les parts de l'azote ingéré recueilli dans le lait, les fèces et l'urine. La distribution de l'azote apparemment digéré correspond aux parts de l'azote apparemment digéré qui sont produites dans le lait et l'urine.

La distribution de l'azote ingéré entre les fèces, l'urine et le lait sera abordée ainsi que les facteurs de variation agissant sur chacun de ces compartiments. Les conclusions des auteurs d'une part et la synthèse réalisée de l'ensemble des résultats disponibles dans la littérature seront présentées.

De ces données, les paramètres clefs permettant la prédiction de la production d'azote dans les trois compartiments de sortie (lait, fèces et urine) sont définis. Les principaux facteurs seront repris dans la partie expérimentale afin d'étudier les variations de la distribution de l'azote alimentaire. Pour toutes les expérimentations, un déficit systématique des apports en azote fermentescible sera établi de façon à se placer dans des conditions permettant un recyclage optimal de l'azote et par conséquent d'en diminuer les excréctions dans les fèces et l'urine. Les résultats seront discutés pour chacune des expérimentations puis une approche globale sera développée dans la discussion générale avec des éléments de modélisation de la sécrétion d'azote dans le lait et des excréctions fécale et urinaire d'azote afin de confronter le modèle établi à partir des données bibliographiques aux modèles publiés à ce jour.

Synthèse bibliographique

I. Facteurs de variation de l'excrétion fécale d'azote

Peu de recherches ont porté spécifiquement sur l'excrétion fécale d'azote. La plupart des données disponibles dans la littérature depuis 1990 relèvent d'essais ayant pour objectif d'étudier la digestibilité (apparente ou réelle) des matières azotées. Ainsi, dans cette partie seront développés les aspects concernant la digestibilité et ses variations qui seront ensuite mis en relation avec l'excrétion fécale.

I.1. Digestibilité de l'azote

La digestibilité de l'azote de la ration chez la vache peut varier de moins de 50% à près de 80%. De nombreux facteurs de variation, principalement alimentaires, influent sur la digestibilité de l'azote.

I.1.1. Digestibilité réelle

La digestibilité réelle est entendue comme le rapport entre la résultante de la digestion des aliments (fraction ayant disparu dans le tube digestif) et l'ingéré. Les fractions alimentaires non digérées ont échappé successivement à la dégradation microbienne du réticulo-rumen, à la digestion dans la caillette et dans l'intestin grêle ainsi qu'à la fermentation microbienne dans le gros intestin. Selon Demarquilly *et al.* (1995), les matières azotées alimentaires non digestibles seraient en premier lieu celles des parois. Ces fractions constitueraient en moyenne 7% des matières azotées totales de la ration. Pour les fourrages verts, la digestibilité réelle de l'azote est élevée et globalement constante de l'ordre de 93% (Demarquilly *et al.*, 1995) ; celle des aliments concentrés est comprise entre 70% et 95% pour les aliments simples les plus fréquemment rencontrés (Aufrère *et al.*, 1989).

I.1.2. Digestibilité apparente

La digestibilité apparente constitue une variable beaucoup plus aisée à mesurer que la digestibilité réelle ; ainsi la majorité des travaux étudiant la digestibilité s'intéresse à la digestibilité apparente. Elle prend en compte l'excrétion fécale totale : excréments d'azote alimentaire et d'azote endogène. Tamminga (1992) estime que la réduction des pertes azotées endogènes constituerait une voie plus encourageante pour la diminution des pertes fécales que la diminution de la quantité d'azote alimentaire non digéré. La teneur en Matière Azotée apparemment Digestible (MAD) des fourrages verts de graminées par kilogramme de Matière Organique (MO) est déterminée à partir de la teneur en Matière Azotée Totale (MAT) de la

ration selon la relation : $\text{MAD apparente (}/\text{kg MO)} = 0.931 \text{ MAT (}/\text{kg MO)} - 39.8 \pm 4.7$ ($r^2=0.99$) (Andrieu *et al.*, 1981). Selon Demarquilly *et al.* (1995), cette équation n'est valable que si le constituant répond au test d'uniformité de Lucas (1962) et que si sa fraction métabolique exprimée en proportion de l'ingéré est constante.

De nombreux facteurs de variation sont recensés comme intervenant sur la digestibilité apparente, seuls les principaux seront présentés.

I.2. Facteurs de variation de la digestibilité

Le Tableau 1 présente les conditions expérimentales des références citées dans cette partie bibliographique.

I.2.1. Caractéristiques de la ration

I.2.1.1. Valeurs azotée et énergétique de la ration

Pour la plupart des données recensées, la digestibilité apparente de l'azote est comprise entre 60 et 75%. La digestibilité apparente des matières azotées alimentaires s'accroît avec l'augmentation de la teneur en MAT de la ration (Figure 1) suivant une relation logarithmique, ce qui s'explique à la fois par une amélioration de la fermentation microbienne et par une digestion plus élevée dans le tractus gastro-intestinal (Ha et Kennelly, 1984 ; Wright *et al.*, 1998). Par ailleurs, la part (non déterminée) d'azote endogène non liée au processus de digestion (nécessaire au maintien des autres grandes fonctions) est diluée quand la quantité d'azote non digéré augmente. Ainsi, une digestibilité réelle constante conduirait à une digestibilité apparente croissante lors d'une augmentation de l'ingestion par ce phénomène de dilution de l'azote endogène. Toutefois, l'effet global observé n'est pas systématique. Wright *et al.* (1998) expliquent que des différences de proportions de protéines peu dégradables dans le rumen pour des niveaux azotés variables peuvent conduire à une digestibilité apparente relativement constante. Pour Berry *et al.* (2001), une supplémentation protéique au pâturage ne conduit pas à des différences significatives de la digestibilité de l'azote qui est estimée via la technique du double marquage aux alcanes de Maynes *et al.* (1986).

Pour McCarthy *et al.* (1989), la nature des sources énergétiques (maïs grain ou orge) incluses dans une ration ne semble pas avoir d'effet sur la digestibilité apparente de l'azote de la ration malgré des digestions post-ruminales différentes des sources énergétiques. De même, lors d'un apport supplémentaire de concentré énergétique à des vaches au pâturage, la

Tableau 1: Excrétion azotée fécale - Récapitulatif des conditions expérimentales des essais de la littérature

Référence	Ration base	Caractéristiques du traitement	MAT ration %	MSI kg/j	Lait kg/j	N fécal g/j	Digestibilité de l'N	Animaux	Conditions expérimentales
Wright et al. 1998	60% E. Maïs 35% Maïs	Farines animales et blé	10,2	18,5	23,4	157	0,48	Vaches laitières Holstein	Restriction alimentaire restriction 10%
			15,9	18,4	25,0	186	0,61		
			22,5	18,7	26,7	173	0,75		
			10,7	16,1	22,4	134	0,51		restriction 20%
			18,0	17,0	26,4	173	0,66		
			24,6	16,9	26,3	178	0,73		
Volden 1999	Ration complète 40% E. Maïs 60% concentré	Dégradabilité basse	17,7	19,5	31,5	151	0,73	Vaches laitières Norvégiennes	Niveau d'ingestion haut
		Dégradabilité haute	17,4	19,1	30,0	155	0,71		
		Dégradabilité basse	14,8	19,7	29,4	141	0,70		
		Dégradabilité basse	17,7	10,2	13,1	69	0,76		Niveau d'ingestion bas
		Dégradabilité haute	17,4	10,0	13,0	71	0,75		
		Dégradabilité basse	14,8	10,4	13,1	70	0,72		
Van Vuuren et al. 1993	Expérimentation 1	Herbe + Amidon ou fibre	16,4	16,8		158	0,64	Vaches laitières Frissonnes Néerlandaises	Voie alimentaire
			15,0	17,9		181	0,58		
	Expérimentation 2	Herbe + E. maïs ou Amidon ou Amidon + fibres ou Fibres	17,2	20,0		165	0,70	Vaches laitières Frissonnes Néerlandaises	Voie alimentaire
			18,1	17,3		175	0,65		
			17,4	18,7		203	0,61		
			17,4	20,5		228	0,60		
	Expérimentation 3	Herbe seule + pulpes betteraves ou + pulpes betteraves ensilées	22,6	14,9		140	0,74	Vaches laitières Frissonnes Néerlandaises	Voie alimentaire
			19,5	17,0		154	0,71		
			19,8	16,7		143	0,73		
		Herbe seule + E. maïs sans enveloppe ou avec enveloppe	22,6	15,2		143	0,74		
			19,8	16,4		156	0,70		
			19,0	17,8		157	0,71		
Peyraud et al. 1997a	67% E. Maïs 5% T. soja Blé, Maïs grain orge	Témoin	10,9	19,8	26,6	133	0,61	Vaches laitières	Voie alimentaire
		urée	13,5	19,8	27,3	140	0,67		
		urée/caséine	13,5	20,0	28,4	133	0,69		
		caséine	13,6	19,8	28,4	133	0,69		

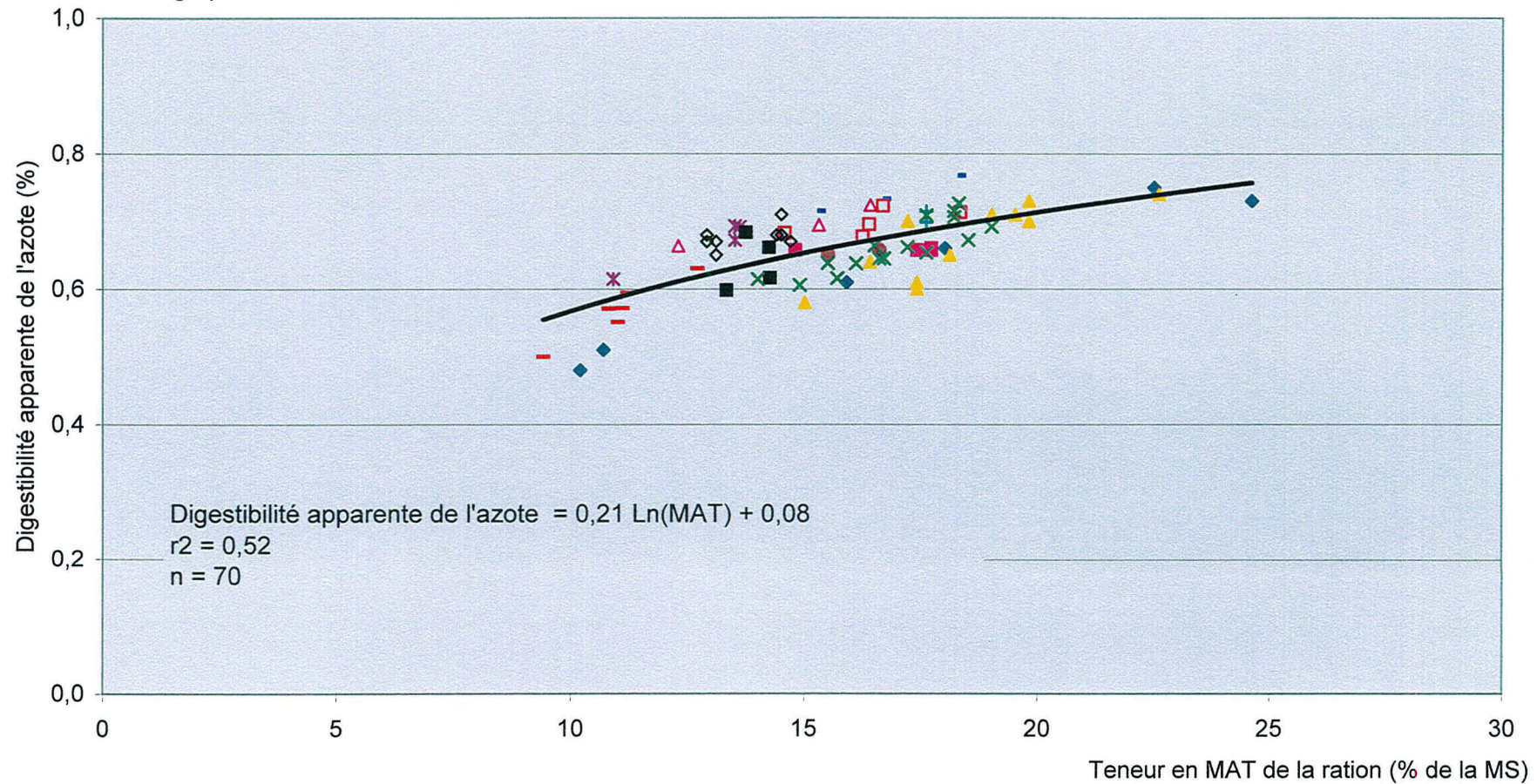
Tableau 1 suite: Excrétion azotée fécale - Récapitulatif des conditions expérimentales des essais de la littérature

Référence	Ration base	Caractéristiques du traitement	MAT ration %	MSI kg/j	Lait kg/j	N fécal g/j	Digestibilité de l'N	Animaux	Conditions expérimentales
Choung et Chamberlain 1992	E. Herbe orge	Témoin			14,1	91	0,72	Vaches	Infusion dans la caillette
		Caséines			17,0	92	0,75	laitières	
		Protéines de soja			16,2	92	0,75	Frisonnes	
		Farine de poisson			16,2	97	0,75		
Wilkerson et al. 1997	Synthèse bibliographique		16,6	17,9	29,0	163,0	0,66	Vaches	Voie alimentaire
			15,5	13,7	13,8	119,0	0,65	laitières	
Belyea et Adams 1990	20-25% E. Maïs								
	Foin luzerne		17,6	17,8	33,5	144	0,71	V. laitières	
	Maïs grain		17,6	15,3	28,0	130	0,70	Holstein	
Dinn et al. 1998	30% E. Herbe	Témoin	18,3	23,7	34,2	158	0,77	Vaches	Addition AA protégés contre dégradation ruminale via l'alimentation
	20% E. Maïs	Lys et Met protégé	16,7	22,3	32,8	155	0,73	laitières	
	50% (orge + T. soja et colza)	Lys et Met protégé + urée	15,3	22,1	32,8	151	0,72	Holstein	
Susmel et al. 1995	55% Foin	Témoin	9,4	14,2	17,6	107	0,50		Voie alimentaire
	45% concentré: Maïs grain	20g urée/kg MS	12,7	14,5	21,0	109	0,63		
	Orge	Stade lactation						Vaches	
	Pulpes betteraves	J21-25	11,1	13,0	22,3	99	0,57	laitières	
		J47-51	11,2	14,3	20,2	104	0,59	Simmentales	
		J73-77	10,8	15,1	18,1	112	0,57		
		J99-103	11,0	15,1	16,6	119	0,55		
Castillo et al. 2001b	E. Herbe	Concentré commercial 21 ou 29% MAT							Voie alimentaire
		MAT basse	14,5	18,1	23,1	134	0,68	Vaches	
		MAT haute	18,3	17,6	24,5	148	0,71	laitières	
		Dégradabilité haute	16,7	17,7	23,8	131	0,72	Holstein	
		Dégradabilité moyenne	16,4	17,9	23,4	143	0,70		
		Dégradabilité basse	16,2	17,9	24,1	150	0,68		
Castillo et al. 2001a	E. Herbe	Concentré NDF élevé	13,7	16,1	20,7	112	0,68	Vaches	Voie alimentaire
		Amidon peu dégradable	13,3	16,0	20,1	137	0,60	laitières	
		Amidon très dégradable	14,2	16,2	19,4	125	0,66	Holstein	
		Sucre soluble	14,3	16,0	19,4	140	0,62		

Tableau 1 suite: Excrétion azotée fécale - Récapitulatif des conditions expérimentales des essais de la littérature

Référence	Ration base	Caractéristiques du traitement	MAT ration %	MSI kg/j	Lait kg/j	N fécal g/j	Digestibilité de l'N	Animaux	Conditions expérimentales
Fisher <i>et al.</i> 2000	Ration complète	Maïs grains	15,3	22,8	34,2	156	0,69	Vaches	Voie alimentaire
	50% E. Herbe	farines soja, maïs	16,4	21,8	35,0	141	0,72	laitières	
	50% E. Maïs	orge	12,3	20,8	31,5	128	0,66	Holstein	
Gonda <i>et al.</i> 1995	E. (herbe+trèfle)	farine niveau bas	13,1	18,8	23,4	139	0,65	Vaches laitières Pie Rouge	Début lactation
	Foin	farine niveau haut	14,7	18,6	26,0	145	0,67		
	Farine de colza	farine traitée bas	13,1	18,6	24,2	132	0,67		
		farine traitée haut	14,5	18,5	26,8	136	0,68		
		farine niveau bas	12,9	15,1	16,3	103	0,67		Fin lactation
		farine niveau haut	14,5	15,7	18,1	106	0,71		
		farine traitée bas	12,9	16,7	19,9	111	0,68		
		farine traitée haut	14,4	17,8	22,4	133	0,68		
Wanjaiya <i>et al.</i> 1993	Trèfle blanc		22,9	13,1	12,6	100	0,79	V. laitières	Restriction 10%
	Trèfle+ E.Maïs		14,8	14,2	12,5	96	0,71	Frisonnes	
Kebreab <i>et al.</i> 2000 Expérimentation 1	E. Herbe:								
	fertilisation haute	Pelels:	18,2	16,9	26,5	140	0,72		
	fertil moyenne	farine de soja +	18,5	17,8	28,3	173	0,67		
	Foin:	avoine						Vaches	
	non tardif/ fertil haute		18,2	17,2	27,1	147	0,71	laitières	Voie alimentaire
	tardif/ fertil haute		18,3	16,5	25,8	132	0,73	Holstein	
	non tardif/ fertil moyenne		18,5	17,8	28,3	173	0,67		
	frais		17,6	17,3	26,6	142	0,71		
	fané		19,0	17,1	27,6	160	0,69		
	Expérimentation 2								
	E.Herbe fané:								
	fertilisation haute		16,1	15,3	24,7	143	0,64		
	fertilisation moyenne		15,7	16,3	25,5	157	0,62	Vaches	
	non tardif / fertilisation haute		14,0	15,4	23,8	133	0,61	laitières Holstein	Voie alimentaire
		Concentré:							
		amidon(avoine, blé) ou fibres (mélasse)	14,9 15,5	15,8 15,6	24,8 24,5	149 140	0,61 0,64		
Expérimentation 3	E. Herbe avec additif:								
	bactérie		16,5	17,7	28,2	157	0,66		
	acide normal		16,6	17,3	26,1	163	0,64	Vaches	
	acide élevé		17,6	17,1	26,6	167	0,65	laitières Holstein	Voie alimentaire
		concentré:							
		avoine ou maïs	17,2 16,7	17,3 17,3	27,0 26,9	161 164	0,66 0,65		

Figure 1: Digestibilité apparente de l'azote en fonction de la teneur en matière azotée de la ration d'après les données de la bibliographie



◆ Wright et al. 1998	■ Volden 1999	▲ Van Vuuren et al. 1993	✕ Peyraud et al. 1997	● Wilkerson et al. 1997
+ Belyea et Adams 1990	- Dinn et al. 1998	- Susmel et al. 1995	■ Castillo et al. 2001a	△ Fisher et al. 2000
□ Castillo et al. 2001b	✕ Kebreab et al. 2000	◇ Gonda et al. 1995		

digestibilité de l'azote reste sensiblement la même (54.2 contre 57.5%, Non Significatif (NS)) (Berry *et al.*, 2001). A partir du modèle de Kebreab *et al.* (2002) (modèle présenté dans le chapitre IV de cette synthèse), une augmentation des apports en énergie dans la gamme de 7 à 11 MJ d'énergie fermentescible métabolisable/kg Matière Sèche (MS), conduit à une augmentation de l'excrétion fécale d'azote avec un effet d'autant plus marqué que le niveau d'ingestion est important. Cette observation est expliquée par les auteurs par le fait que l'énergie supplémentaire apportée conduit à une augmentation de la croissance microbienne au niveau du rumen et du colon en fonction de la nature du substrat énergétique. L'excrétion fécale serait alors augmentée par une excrétion plus importante d'azote microbien non digéré.

I.2.1.2. Nature des sources azotées, mode de conservation et traitements

La digestibilité apparente de l'azote des fourrages est très variable. Elle diminue de 0.81 à 0.41 quand la teneur en MAT des fourrages verts passe de 250 à 60 g/kg MS (Demarquilly *et al.*, 1995). Ces auteurs observent également une diminution de la digestibilité lors de la déshydratation des fourrages (par chauffage) suite aux réactions de Maillard. De même, un échauffement des foin lors du stockage (teneur en matière sèche insuffisante par exemple) peut conduire à une diminution de la digestibilité des matières azotées. La conservation sous forme d'ensilage ne semble pas (lorsqu'il n'y a pas d'échauffement) modifier la digestibilité apparente des MAT par rapport au fourrage vert. Pour les graminées, la digestibilité apparente des matières azotées n'est pas diminuée ou seulement très légèrement lors d'une distribution à volonté sous forme broyée (Demarquilly *et al.*, 1995). Dans ce dernier cas l'excrétion fécale supplémentaire est attribuée à une augmentation de l'excrétion d'azote microbien due à une fermentation accrue des glucides pariétaux dans le gros intestin, la vidange du rumen étant accélérée par la finesse des particules.

Les aliments concentrés généralement de natures variées (graines, racines, fruits ...) peuvent avoir subi des traitements technologiques différents (chauffage, broyage, solubilisation ...). Ils présentent donc des caractéristiques diverses souvent modifiées par des traitements technologiques supplémentaires (extrusion, traitement au formol par exemple). Toutefois, leur digestibilité apparente est directement fonction de leur teneur en MAT ($dMAT = 0.973 - 33.3/MAT$ avec la MAT exprimée en g/kg MO) pour les situations où les aliments n'ont pas subi de chauffage excessif, ni ne contiennent trop de tannins selon Demarquilly *et al.* (1995) sans que les auteurs ne déterminent les seuils correspondants.

La teneur en Matière Azotée Non Digestible (MAND) est de l'ordre de 45 g/kg de MS pour les fourrages verts (Demarquilly *et al.*, 1995). Cette valeur de MAND est relativement stable lorsque la teneur en matière azotée des aliments augmente. Ainsi, les variations de la teneur en matières azotées des fèces pourraient être expliquées par des variations de la quantité d'azote non alimentaire et indigestibles.

I.2.2. Niveau d'ingestion et couverture des besoins

D'après les données de la littérature, la digestibilité de l'azote chez la vache laitière n'est que très faiblement corrélée ($r^2=0.09$) au niveau d'ingestion de MS pour une plage d'ingestion de 10-25 kg/j (Figure 2). Cependant, l'observation d'une digestibilité plus forte (+ 2 points), lorsque le niveau d'ingestion est plus faible (restriction de 2 à 20% de l'*ad libitum*), est globalement réalisée dans une synthèse d'essais sur ovins, caprins et bovins (29 régimes différents) (Dulphy *et al.*, 1995). Pour Vérité et Delaby (2000), l'excrétion fécale d'azote peut être directement liée à la Matière Sèche Ingérée (MSI) (7.2 g N/kg MSI) puisque les différences de composition des rations n'ont qu'un léger effet. Toutefois, la synthèse de Doreau *et al.* (2000) à partir de 70 publications (253 résultats) indique que la réponse de la digestibilité à une baisse de niveau alimentaire est variable sans que le temps de rétention des particules dans le rumen, la taille de ces particules ainsi que l'activité microbienne ne soient modifiées. Deux hypothèses sont alors émises par les auteurs pour expliquer les variations de digestibilité : 1) un déficit en nutriments spécifiques des microbes, 2) une modification des interrelations entre particules et micro-organismes. Pour ces mêmes auteurs et dans une situation d'alimentation à volonté, une augmentation du niveau d'ingestion se traduit par une diminution de la digestibilité quelle que soit la composition de la ration et l'espèce animale (ovine ou bovine). Cependant, la quantité d'azote ingéré intervient davantage sur les valeurs de la digestibilité de l'azote (Figure 3). Elle permet en effet d'expliquer les variations de digestibilité à hauteur de 34%.

Il semblerait qu'aucun phénomène de saturation des activités enzymatiques n'apparaisse dans la gamme d'ingestion étudiée. Ces résultats vont à l'encontre d'une meilleure digestion lorsque les apports sont faibles comme il a pu être pensé à priori par Blaxter *et al.* (1956) via une accélération du transit digestif lors d'apports croissants. Ils font davantage penser à un effet de multiplication des micro-organismes impliqués dans la digestion d'une part et une adaptation des sécrétions digestives au chyme transitant comme le montrent Guilloteau *et al.* (1995) chez les ruminants d'autre part. La conséquence de ces deux phénomènes serait une

Figure 2: Digestibilité apparente de l'azote en fonction de la matière sèche ingérée d'après les données de la bibliographie

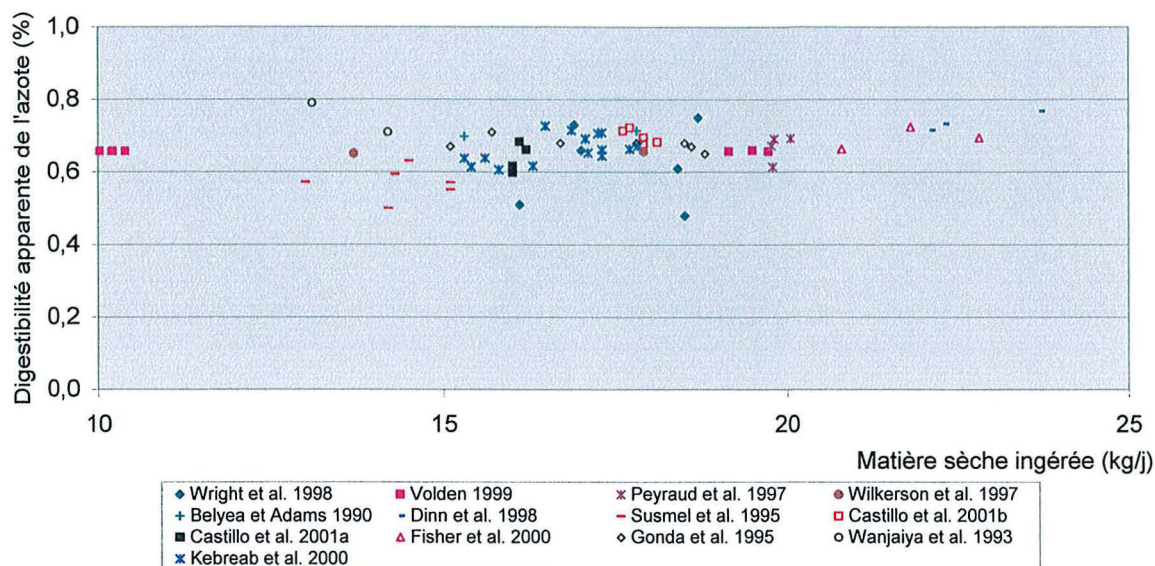
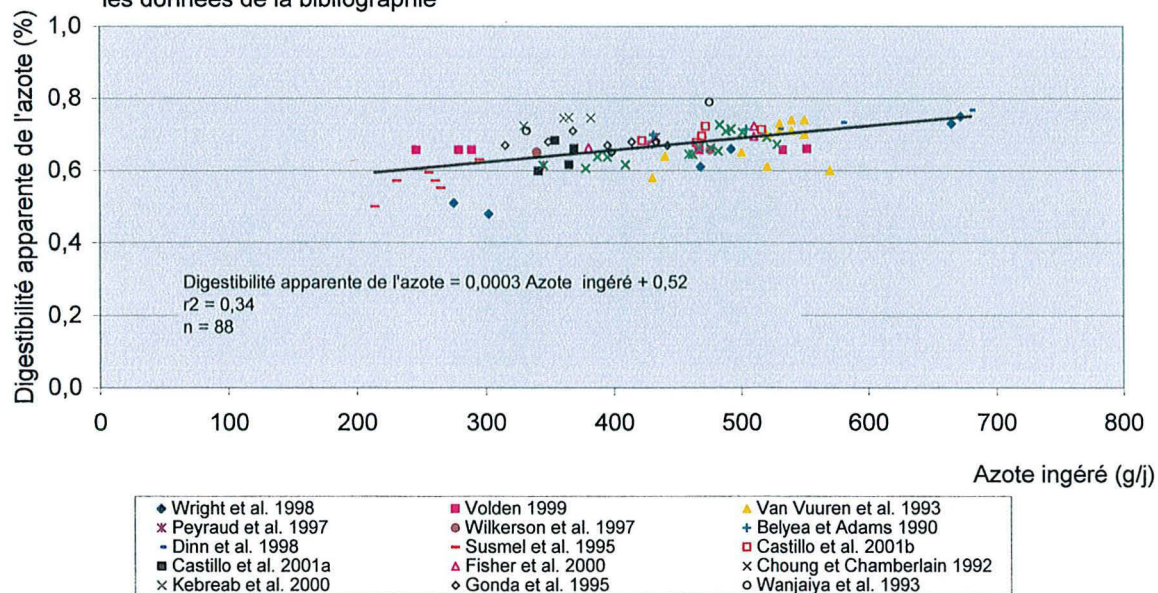


Figure 3: Prédiction de la digestibilité de l'azote à partir de la quantité ingérée d'azote d'après les données de la bibliographie



amélioration de la digestibilité avec très probablement une capacité d'adaptation qui ne serait pas totale.

Le niveau de couverture des besoins en azote est défini comme le rapport entre l'azote ingéré et la somme des besoins :

$$\text{Taux de couverture azotée (en \% des besoins)} = 100 \times \frac{\text{Azote ingéré (g/j)}}{\frac{95 + 0.5 \times \text{Poids vif(kg)}}{6.25} + \text{Azote du lait (g/j)}}$$

Il a été calculé à partir des données disponibles dans la littérature et il conduit à la prédiction de 64% de la variabilité de la digestibilité apparente de l'azote de la ration par une relation logarithmique (Figure 4). De façon surprenante, seul un essai (Susmel *et al.*, 1995) engendre une couverture inférieure (85%) ou égale à 100% des besoins. La plupart des études concernent la plage 120 - 160% des besoins ; les points situés au-delà de 200% pouvant être considérés hors pratiques alimentaires courantes. La concentration des valeurs observées pour des taux de couverture compris entre 100 et 200% des besoins conduit à une relation plutôt linéaire.

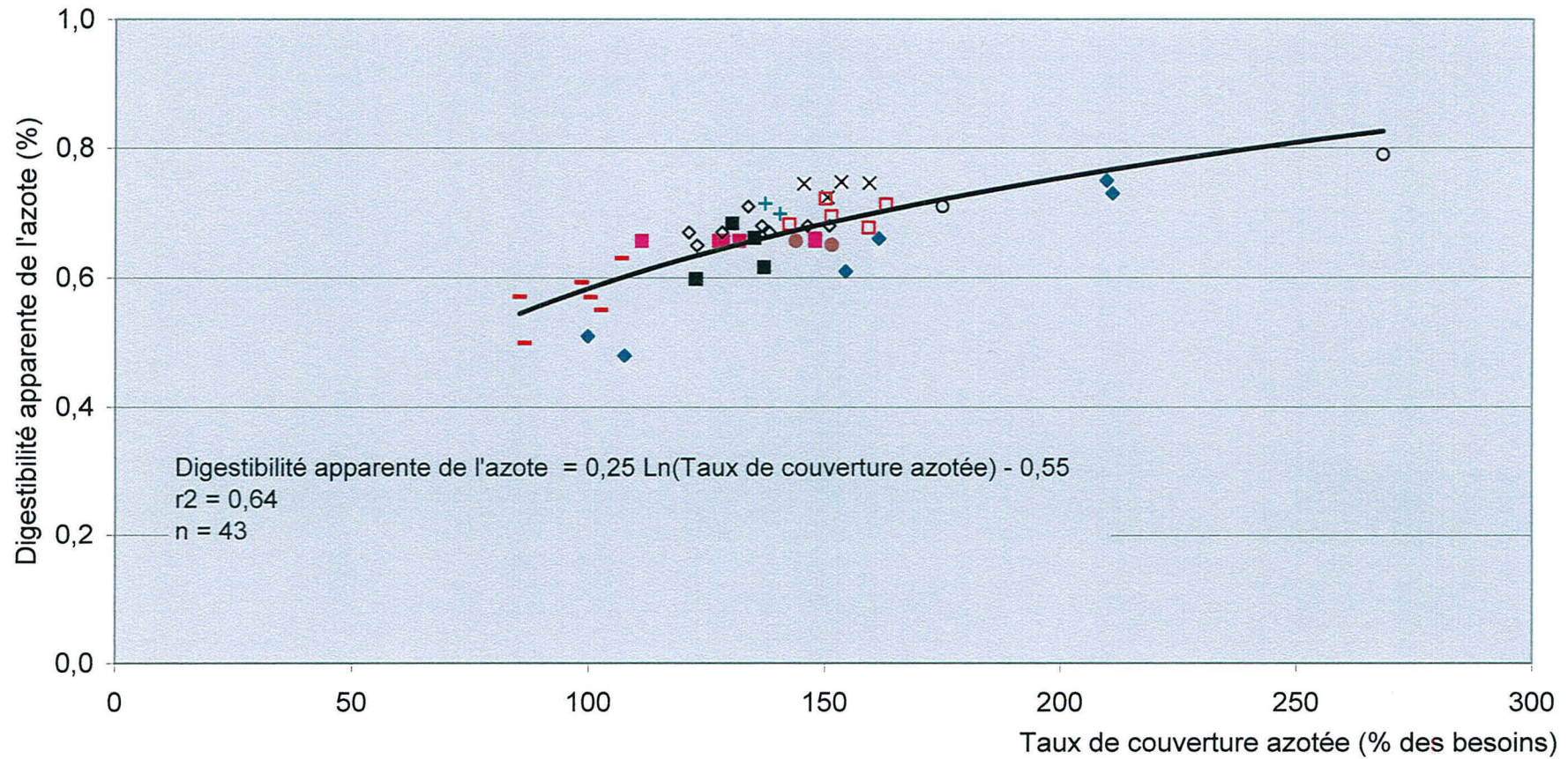
I.2.3. Dégradation ruminale

I.2.3.1. Protéolyse

L'utilisation de l'azote par les micro-organismes implique une hydrolyse des protéines alimentaires (de 30 à 90%). Cette hydrolyse consiste en une succession d'actions enzymatiques faisant passer la protéine par le stade polypeptide, oligopeptide pour fournir des produits terminaux (acides aminés, ammoniac). La quasi-totalité (91%) des activités protéolytiques présentes dans le rumen sont d'origine bactérienne (Brock *et al.*, 1982).

L'hydrolyse des protéines alimentaires par les micro-organismes du rumen dépend de leurs caractéristiques propres, ainsi que de l'environnement dans lequel elles sont placées. Ainsi, une intensité modérée de l'activité protéolytique est suffisante à la dégradation rapide et totale d'une protéine très soluble. Par exemple, les matières azotées contenues dans les fourrages non traités, principalement cytoplasmiques, sont dégradées à raison de 2/3 à 3/4 au niveau ruminal (Vérité *et al.*, 1987). La dégradation ruminale des matières azotées contenues dans les ensilages, les foin et les aliments concentrés dépend grandement de la qualité du stockage ou des traitements appliqués. La présence importante d'inhibiteurs de trypsine dans

Figure 4: Digestibilité de l'azote en fonction du niveau de couverture des besoins azotés d'après les données de la bibliographie



- | | | |
|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| ◆ Wright et al. 1998 | ■ Volden 1999 | × Choung et Chamberlain 1992 |
| ● Wilkerson et al. 1997 | + Belyea et Adams 1990 | - Susmel et al. 1995 |
| □ Castillo et al. 2001b | ■ Castillo et al. 2001a | ◇ Gonda et al. 1995 |
| ○ Wanjaiya et al. 1993 | | |

l'alimentation peut conduire à l'inactivation d'enzymes responsables de la protéolyse (Tamminga *et al.*, 1995).

Le caractère hautement dégradable ou non d'une protéine peut avoir des répercussions à l'échelle du rumen. Une accessibilité aisée à une protéine, substrat de plusieurs souches bactériennes, conduit vraisemblablement à une intensité élevée de protéolyse. La croissance et la multiplication de ces micro-organismes peuvent stimuler le développement d'autres bactéries par l'utilisation des produits d'hydrolyse émis par ces premières, conduisant ainsi à une réaction en cascade. A l'inverse, une protéine peu soluble par nature ou à la suite d'un traitement technologique, nécessitera pour son hydrolyse une intensité enzymatique plus élevée ou des enzymes mieux adaptées. Dans ces conditions, l'activité enzymatique peut être protéolytique et intense dans le cas de protéines difficilement dégradables, mais elle peut aussi être cellulolytique pour une protéine facilement dégradable mais difficilement accessible suite à la présence de cellulose. Cette synergie des bactéries cellulolytiques et protéolytiques nécessaire pour atteindre les protéines pariétales a été montrée *in vitro* par Debroas et Blanchart (1993).

De façon générale, la concentration en sucres affecte peu l'activité protéolytique d'un inoculum ruminal mixte vis-à-vis de la caséine (Russell *et al.*, 1983). *In vitro*, des variations opposées d'activités protéolytiques des espèces isolées peuvent exister (Tableau 2) sans modification de l'activité protéolytique globale (Debroas, 1992).

I.2.3.2. Protéosynthèse

Les pertes azotées ruminales résultent d'une dégradation des protéines alimentaires à un rythme supérieur à celui de la synthèse des protéines microbiennes (Tamminga, 1992). A partir des produits de dégradation des protéines alimentaires, les micro-organismes synthétisent les protéines ainsi que les acides nucléiques. Seule une faible fraction de la synthèse protéique microbienne a lieu à partir des AA issus de la protéolyse (Jouany *et al.*, 1995). En effet pour ces auteurs, l'ammoniac et les chaînes carbonées représentent les principaux réservoirs pour la synthèse d'AA bactériens et la majorité des AA incorporés par les protozoaires est fournie par la prédation des bactéries. Ainsi, les traitements technologiques des compléments azotés peuvent conduire à une diminution de la synthèse protéique microbienne en limitant les apports en azote fermentescible (Dewhurst *et al.*, 2000). De plus, des apports insuffisants en énergie fermentescible pour les micro-organismes même compensés par une complémentation en matière grasse de la ration (modification de la

Tableau 2: Effet des apports en sucres sur les activités
protéolytiques individuelles des bactéries du rumen
(d'après les données de Debroas, 1992)

Souche bactérienne	Nature du sucre	Modification de la concentration	Effet sur l'activité protéolytique
P. ruminicola S17/3	Cellobiose		
	Xylose		
	Galactose		
	Arabinose		
B. fibrisolvens S23	Cellobiose		
	Xylose		
	Galactose		
	Arabinose		
S. bovis SI	Glucose		
	Cellobiose		
	Xylose		
	Galactose		

composition de la population microbienne) peuvent également diminuer la synthèse protéique microbienne (Dewhurst *et al.*, 2000). La notion d'efficacité de la synthèse microbienne est souvent rencontrée dans la littérature et correspond à la quantité d'azote microbien néo-synthétisé par kg de Matière Organique Fermentescible (MOF). Le système PDI a retenu pour la synthèse microbienne, la valeur de 145 g de protéine/kg MOF soit 23.2 g N microbien/kg MOF (Vérité et Peyraud, 1988). D'autres données indiquent une synthèse protéique de l'ordre de 30 à 45 g d'N microbien / kg de MO apparemment digéré au niveau du rumen pour des animaux alimentés au pâturage avec de l'herbe de bonne qualité ou à l'auge (Dewhurst *et al.*, 2000).

La nature et les composants des fourrages peuvent également moduler le niveau de protéosynthèse ruminale. Ainsi, Verbič *et al.* (1999) observent une efficacité de la synthèse protéique microbienne plus importante lorsque des moutons sont alimentés avec du foin en comparaison de l'ensilage obtenu à partir de la même parcelle. Pour Dewhurst *et al.* (2000), un fourrage ensilé apporte des glucides ayant subi une fermentation dans le silo et conduit à une protéosynthèse plus faible que celle observée à partir des fourrages frais. Il pourrait être supposé que la disponibilité en sucres fermentescibles est alors réduite. La synchronisation des apports en azote et en énergie fermentescibles semble conduire à une optimisation de la protéosynthèse (Herrera-Saldana et Huber, 1989 ; Aldrich *et al.*, 1993 ; Poore *et al.*, 1993), ceci vraisemblablement par une meilleure captation de l'azote dégradé. Dewhurst *et al.* (2000) émettent un doute sur l'origine de l'effet observé : est-ce réellement un effet de la synchronisation des apports en azote et en énergie, ou un effet de la combinaison des aliments utilisés ? Cette incertitude confirme celle de Kim *et al.* (1999a et b) qui lors de deux expérimentations similaires observent ou non un effet de la synchronisation des apports en énergie fermentescible (infusion de saccharose) avec les apports en azote fermentescible. Selon Tamminga (1992), l'ensilage de maïs présenterait un intérêt en terme de protéosynthèse par sa faible teneur en azote et ses apports en énergie favorisant ainsi une utilisation importante de l'azote disponible.

Un niveau croissant d'ingestion diminue l'efficacité de la synthèse microbienne (Dewhurst *et al.*, 2000), ce qui pourrait éventuellement être un effet de la vitesse de transit qui augmente avec l'ingestion (Faichney, 1995). Pour Tamminga (1992), une fréquence d'ingestion plus élevée permettrait de compenser d'éventuelles différences de disponibilité entre les apports azotés et énergétiques. Ceci est appuyé par le fait que l'influence de la synchronisation diminue lorsque la fréquence d'alimentation augmente (Mills *et al.*, 1999). Les aliments concentrés apportés dans la ration peuvent avoir un effet inhibiteur sur la synthèse protéique

microbienne en raison de chutes de pH (Tamminga, 1992). Ces observations vont dans le sens d'une meilleure utilisation des apports lors d'une distribution en ration complète.

Le rumen constitue un compartiment clef dans la valorisation de l'azote. Dans une situation d'apports azotés élevés et rapidement fermentescibles, les quantités d'ammoniac libéré seront trop importantes pour pouvoir être valorisées par protéosynthèse. L'ammoniac sera alors absorbé au niveau de la paroi ruminale pour rejoindre la circulation sanguine sous forme d'urée, puis les voies d'élimination et éventuellement de recyclage. L'ammoniac excédentaire, dont la valorisation n'est pas possible par défaut d'énergie ou de par un potentiel génétique limité, est excrété sous forme d'urée dans l'urine ou le lait.

I.2.4. Digestion post-ruminale

I.2.4.1. Digestion dans la caillette

Le pH de la caillette est maintenu bas (de 2 à 3) par une sécrétion continue d'acide chlorhydrique. Ces conditions sont considérées comme favorables à l'action de la pepsine sur les matières azotées (Toullec et Lallès, 1995), même si le temps de séjour des aliments dans ce compartiment est court (entre 1/2 et 1 heure). Par ailleurs, le lysozyme contenu dans le suc gastrique a pour action de dégrader les bactéries en attaquant les peptidoglycanes des parois. La dégradation des bactéries associées aux particules alimentaires s'élève chez le mouton à 30-70% au niveau de la caillette (Yang, 1991). En revanche, chez le ruminant, l'hydrolyse des protéines d'origine alimentaire est peu efficace dans ce compartiment (inférieure à 5% pour les fourrages, le maïs et la pulpe de betterave), à l'exception de l'hydrolyse du tourteau de soja (34%) (Toullec et Lallès, 1995).

I.2.4.2. Digestion intestinale

- Intestin grêle

La digestion des matières azotées au niveau intestinal est dépendante des enzymes des sécrétions digestives et des actions enzymatiques propres au compartiment (activité cellulaire). L'hydrolyse des protéines débute par l'action d'endopeptidases pancréatiques, suivie de l'action de carboxypeptidases (Toullec et Lallès, 1995). Ces auteurs admettent, par extrapolation des résultats de Rérat et Corring (1991) obtenus chez divers mammifères, que l'action du suc pancréatique conduit à un mélange composé à 70% de petits peptides (2 à 6 AA) et à 30% d'AA libres. Cette situation met en évidence le caractère incomplet de la

protéolyse au niveau intestinal. De plus, elle est inégale suivant la composition en AA de la protéine (Tableau 3). L'hydrolyse se poursuit au niveau de la bordure en brosse des cellules intestinales par l'action d'aminopeptidases, de carboxypeptidases, de dipeptidylpeptidases et d'endopeptidases, enzymes en majorité ancrées à la membrane de la bordure en brosse des entérocytes (Guilloteau *et al.*, 1995). Les oligopeptides sont alors hydrolysés en di- et tripeptides et en AA libres, et plus de la moitié des tripeptides en AA libres.

Au niveau de l'intestin grêle des monogastriques, il a été montré que l'azote uréique ou ammoniacal excrété dans la lumière peut être réabsorbé après incorporation dans les AA (Millward *et al.*, 2000). Lapierre et Lobley (2001) considèrent qu'un mécanisme similaire peut exister chez les ruminants avec toutefois des quantités très faibles.

- Gros intestin

L'intérêt porté à la flore du gros intestin est moindre par rapport à celle du rumen. Cependant, la présence de bactéries dans ce compartiment digestif est montrée depuis plus de 50 ans (Hale *et al.*, 1947). Les bactéries sont considérées comme peu différentes de celles de la flore ruminale (Ulyatt *et al.*, 1975) mais en quantités moins importantes (Hoover, 1978). La présence de protozoaires et de champignons n'est toujours pas démontrée de manière claire. L'azote arrivant dans ce compartiment représente de 25 à 50% de la quantité d'azote ingéré (Tisserand et Demarquilly, 1995). Les protéines constituent de 40 à 80% de cet azote, elles peuvent être d'origine alimentaire, microbienne et endogène. Le reste de l'azote comprend l'azote du mucus sécrété par la paroi du gros intestin, les cellules desquamées et l'urée recyclé à ce niveau (Tisserand et Demarquilly, 1995). Les activités enzymatiques des bactéries (protéolyse, désamination, décarboxylation, uréolyse) sont intenses et conduisent à une production de plus de 3 g d'ammoniac /j dans le cæcum du mouton dont ¼ proviendrait de l'urée endogène (Dixon et Nolan, 1982). La synthèse des protéines microbiennes se fait à partir de l'ammoniac. Les protéines néo-synthétisées sont très peu absorbées puisque le colon est incapable d'absorber de manière significative les AA (Tisserand et Demarquilly, 1995).

I.2.5. Azote fécal endogène

La perte azotée endogène via les fèces est estimée à 60 g/kg MO non digestible (Jarrige, 1988) ou 6 g/kg MS ingérée (Demarquilly *et al.*, 1995). L'azote fécal d'origine alimentaire représente moins de 20% de l'azote fécal total pour une alimentation sans tannin ni chauffage excessif (Demarquilly *et al.*, 1995). Mason (1969) estime entre 57 et 81% la part d'azote d'origine microbienne dans l'azote fécal endogène. Pour Demarquilly *et al.* (1995), l'azote

Tableau 3: Hydrolyse intestinale des peptides
selon leur composition chez les ruminants
(d'après Toullec et Lallès, 1995)

AA composant les peptides	Intensité de l'hydrolyse
AA basiques: Lys et Arg AA neutres: Val, Leu, Met, Phe et Tyr	Forte
Gly, Pro, OH-Pro, Thr, Ser, Asp, Glu	Faible

fécal endogène est majoritairement constitué d'azote insoluble (70 à 77%), essentiellement de l'azote bactérien, et aussi d'azote soluble qui correspondrait à l'autolyse des bactéries, à leur contenu cellulaire, à leurs sécrétions enzymatiques et à l'azote endogène d'origine animale. Ainsi, la part importante que peut représenter l'azote endogène est expliquée par le fait que de l'azote des micro-organismes (majoritairement du gros intestin) y est inclus, par conséquent cette proportion n'est pas uniquement constituée d'azote issu du catabolisme.

Le nombre de sources possibles de l'azote fécal endogène engendre de nombreux points susceptibles de faire évoluer ce paramètre. Les sécrétions salivaire et biliaire sont variables en fonction de la quantité et du type de protéines contenues dans la ration (Zebrowska *et al.*, 1982 ; Simon *et al.*, 1983). En revanche, les sécrétions pancréatiques varieraient peu avec la composition de la ration (Tamminga *et al.*, 1995). Au niveau intestinal, l'ampleur de la desquamation et celle de la sécrétion de mucus seraient liées à la quantité et la qualité du digesta (Tamminga *et al.*, 1995). Une alimentation riche en fibres conduit à une desquamation accrue des cellules épithéliales par une abrasivité élevée. Les lectines sont des glycoprotéines présentes dans les graines de légumineuses se liant à des sucres et protéines de manière spécifique. Elles affecteraient le renouvellement et la production du mucus associé à l'épithélium intestinal par la présence au niveau du mucus de liaisons glyco-conjuguées libres ou liées au glycocalyx qui constitue une cible. La conséquence est une diminution de la digestion et de l'absorption des aliments observées chez le porc (Kik *et al.*, 1990). Ces données pourraient être transposées aux ruminants par analogie de la digestion intestinale. Alpers (1983) indiquent une hydrolyse importante des protéines des cellules épithéliales détachées de la paroi intestinale, cette protéolyse étant associée à une réabsorption élevée dans la suite du tractus digestif. De ce fait, la desquamation des cellules épithéliales aurait des conséquences réduites en ce qui concerne les pertes azotées endogènes. Le mucus, plus résistant à la protéolyse que les protéines cellulaires (Tamminga *et al.*, 1995), conduirait à des pertes azotées élevées dues à la réabsorption réduite de l'azote ainsi émis.

Une augmentation de l'énergie dans la ration permettrait de diminuer la part de l'azote endogène rejeté dans l'urine en augmentant la part rejeté dans les fèces. La quantité totale d'azote endogène excrétée reste cependant sensiblement la même évaluée à 333 mg/kg poids métabolique/j (Giráldez *et al.*, 1997). Cette observation est proche de la valeur proposée par le conseil de recherche en agriculture et alimentation (AFRC) qui est de 350 mg/kg poids métabolique/j, ce qui correspondrait approximativement à 10% de l'azote ingéré.

I.3. Conclusion : éléments d'une loi de réponse

La digestibilité apparente de l'azote est majoritairement comprise entre 60 et 75%. Aucune saturation des activités enzymatiques n'est mise en évidence. La prédiction de la variabilité de la digestibilité apparente est assez bonne avec la teneur en MAT de la ration ($r^2=0.52$) ou le taux de couverture des besoins en azote ($r^2=0.64$). L'azote endogène représente jusqu'à 80% de l'azote fécal. Cette notion est primordiale en terme de digestibilité apparente. Les pertes fécales d'azote endogène sont estimées à 60 g/kg MO non digérée. Elles sont composées de l'azote des sécrétions digestives, des cellules desquamées et également de l'azote microbien non digéré. Toutefois, une part de l'azote issu du catabolisme peut être réabsorbée au cours du transit (principalement celui des cellules épithéliales). L'introduction d'énergie supplémentaire dans la ration pourrait permettre une diminution de l'ampleur de ces pertes. Cependant, la nature de l'énergie apportée semble primordiale : une source énergétique hautement fermentescible engendrerait une utilisation accrue de l'azote dégradé à ce niveau et par conséquent une diminution de l'azote fécal ; alors qu'une source lentement fermentescible pourrait entraîner davantage de fermentation dans le colon ce qui conduirait à des pertes importantes d'azote des bactéries dans les fèces.

L'ensemble des données bibliographiques traitées dans cette partie (Tableau 1) permet d'établir une équation de prédiction de la digestibilité apparente. Les variables qui influent de manière significative ($P<0.05$) sur la digestibilité apparente de l'azote sont la teneur en MAT de la ration ainsi que le niveau d'ingestion en MS.

Digestibilité apparente d'N = $0.353 + 0.013 \times \text{MAT de la ration (\%)} + 0.006 \times \text{MS ingérée (kg/j)}$

($r^2 = 0.61$; ETR = 0.035 ; n = 77)

A partir de ces mêmes données, une équation de prédiction de l'excrétion fécale d'azote a été établie pour des valeurs (de la bibliographie ou recalculées) comprises entre 63 et 173 g N/j. Les paramètres dont les parts d'explication de la variabilité de l'azote fécal sont les plus importantes sont l'azote ingéré et la teneur en MAT de la ration :

N fécal (g/j) = $82.7 + 0.24 \times \text{N ingéré (g/j)} - 3.12 \times \text{MAT de la ration (\%)}$

($r^2 = 0.60$; ETR = 14.9 ; n = 77)

Les équations proposées ont été établies pour les gammes 200-700 g d'azote ingéré/j et 10-25% MAT dans la MS de la ration. La précision de la prédiction de l'estimation pourrait

éventuellement être améliorée par l'introduction d'autres variables telle que l'énergie mais les données disponibles ne permettent pas de mettre en évidence un effet significatif.

La digestibilité de l'azote constitue un paramètre très étudié alors que l'intérêt porté à l'excrétion fécale d'azote est restreint. Une équation permettant une prédiction à l'aide de variables simples à mesurer, a pu être établie à partir des données de la littérature. Toutefois, la quasi-totalité des données utilisées sont associées à des niveaux de couverture des besoins azotés largement excédentaires.

II. Facteurs de variation de l'excrétion urinaire d'azote

II.1. Excrétion urinaire

L'azote urinaire constitue pour l'organisme la voie prépondérante d'excrétion de l'excédant d'azote circulant qui est présent principalement sous forme d'urée. Pour une vache laitière, cette voie peut conduire à des excrétions très variables (de 50 à 350 g N/j, Tableau 4), représentant jusqu'à 60% de l'azote ingéré. Cette voie d'excrétion peut, selon les caractéristiques de la ration, être inférieure ou supérieure à l'excrétion fécale (Figure 5).

L'azote urinaire peut provenir de différentes sources : fuites ruminales, pertes d'entretien, acides nucléiques microbiens et acides aminés absorbés et non valorisés (Tamminga, 1992). L'urée peut être recyclée aux niveaux salivaire, ruminal ainsi qu'intestinal. Cette voie possible d'excrétion de l'azote est mise à contribution lorsque l'urée circulante n'a pu être valorisée par le recyclage. Au-delà de l'absorption, les causes des pertes d'urée peuvent être dues aux besoins en précurseurs glucogéniques du foie et des intestins, à une composition inadéquate en AA pour la synthèse des protéines du lait, à un potentiel génétique ne permettant pas une production de lait supplémentaire. Ainsi, selon Tamminga (1992), l'utilisation hépatique entraîne des pertes de l'ordre de 30% des AA absorbés et la synthèse mammaire entre 10 à 15% par inadéquation dans la nature des AA. A partir des estimations des pertes azotées d'entretien dans l'urine de Swanson (1982) (pertes = 0.44 g d'N/kg de PV^{0.5}) et d'Ørskov (1984) (pertes = 1 à 1.5 g d'N/kg de PV^{0.5}), Tamminga (1992) estime ces pertes entre 10 et 40 g d'N/j pour une vache de 600 kg.

Taleau 4: Excrétion azotée urinaire - Récapitulatif des conditions expérimentales des essais de la littérature

Référence	Ration base	Caractéristiques du traitement	MAT ration %	MSI kg/j	Lait kg/j	N urinaire g/j	Animaux	Conditions expérimentales
Wright et al. 1998	60% E. Maïs 35% Maïs	Farines animales et blé	10,2	18,5	23,4	59	Vaches laitières Holstein	Restriction alimentaire de la ration de base: restriction 10%
			15,9	18,4	25	154		
			22,5	18,7	26,7	303		
			10,7	16,1	22,4	70		restriction 20%
			18,0	17,0	26,4	185		
Volden 1999	Ration complète 40% E. Maïs 60% concentré	Dégradabilité basse	17,7	19,5	31,5	198	Vaches laitières Norvégiennes	Niveau d'ingestion haut
		Dégradabilité haute	17,4	19,1	30,0	195		Niveau d'ingestion bas
		Dégradabilité basse	14,8	19,7	29,4	129		
		Dégradabilité basse	17,7	10,2	13,1	135		
		Dégradabilité haute	17,4	10,0	13,0	142		
Van Vuuren et al. 1993	Herbe seule + amidon ou fibre			14,6			Vaches laitières Frisonnes	Voie alimentaire
			16,4	16,8		154		
			15,0	17,9		125		
	Herbe + E. Maïs ou amidon ou amidon + fibre ou fibre							
			17,2	20,0		242		
			18,1	17,3		190		
			17,4	18,7		177		
			17,4	20,5		188		
	herbe seule + pulpe betteraves ou + pulpe betteraves ensilées		22,6	14,9		313		
			19,5	17,0		260		
			19,8	16,7		281		
	herbe seule + E. Maïs sans enveloppe ou avec enveloppe		22,6	15,2		319		
			19,8	16,4		255		
			19,0	17,8		270		
Peyraud et al. 1997a	67% E. Maïs	Témoin	10,9	19,8	26,6	61	Vaches laitières	Voie alimentaire
	5% T. soja	urée	13,5	19,8	27,3	126		
	Blé, Maïs grain	urée/caséine	13,5	20,0	28,4	124		
	orge	caséine	13,6	19,8	28,4	122		

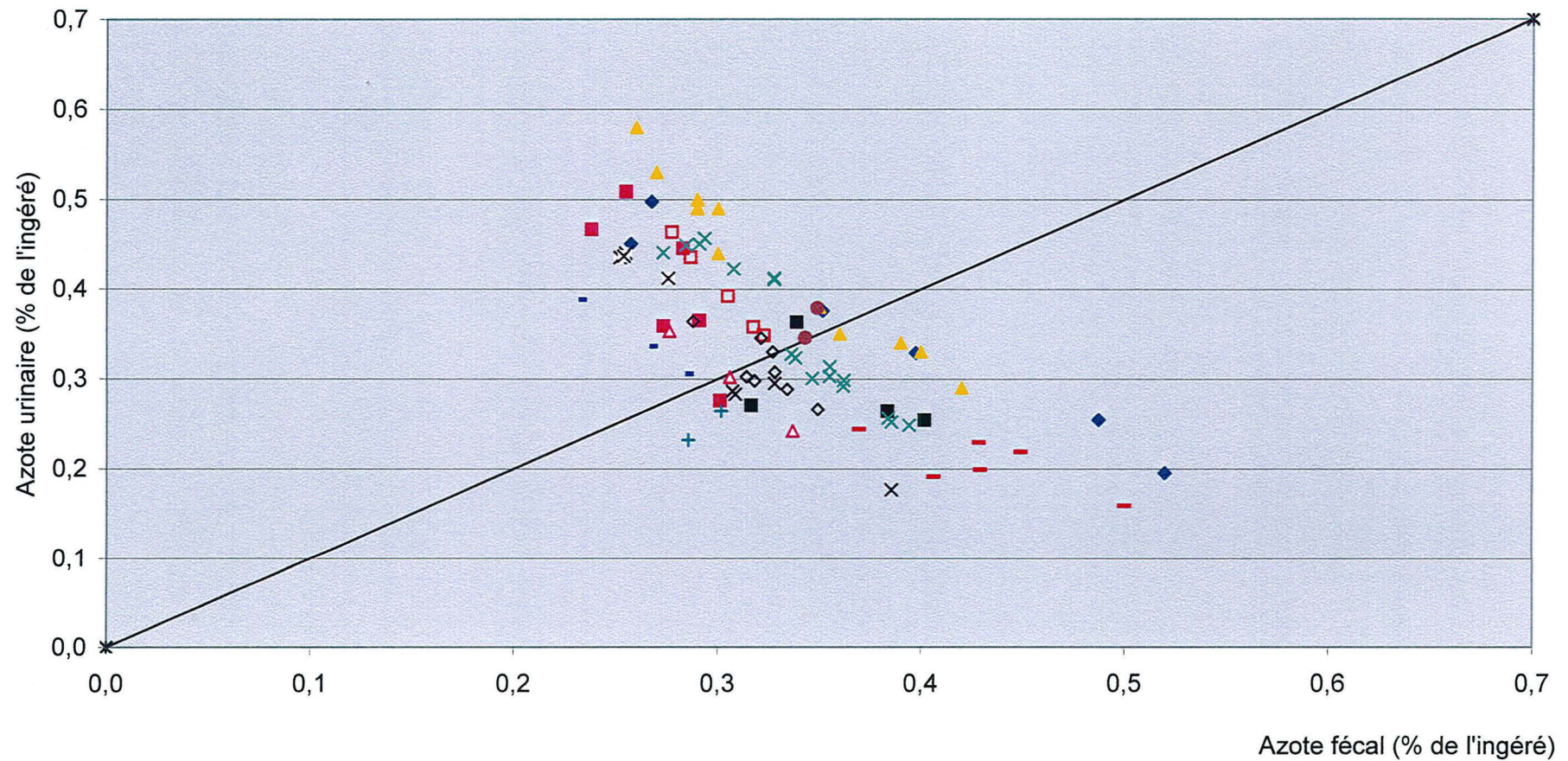
Taleau 4 suite: Excrétion azotée urinaire - Récapitulatif des conditions expérimentales des essais de la littérature

Référence	Ration base	Caractéristiques du traitement	MAT ration %	MSI kg/j	Lait kg/j	N urinaire g/j	Animaux	Conditions expérimentales
Gonda et Lindberg 1994	E. (herbe+trèfle) Foin Farine de colza	farine niveau bas	13,2	18,8		107	Vaches laitières	Début lactation
		farine niveau haut	14,9	18,6		136	Suédoise	
		farine traitée bas	13,3	18,6		114		
		farine traitée haut	14,6	18,5		131		
		farine niveau bas	13,0	15,1		104		Fin lactation
		farine niveau haut	14,6	15,7		134		
		farine traitée bas	13,1	16,7		104		
		farine traitée haut	14,6	17,8		143		
Choung et Chamberlain 1992	E. Herbe orge	Témoin			14,1	136	Vaches laitières	Infusion dans la caillette
		Caséines			17,0	159	laitières	
		Protéines de soja			16,2	159	Frisonnes	
		Farine de poisson			16,2	167		
Wilkerson et al. 1997	Synthèse bibliographique		16,6	17,9	29,0	164	Vaches laitières	Voie alimentaire
			15,5	13,7	13,8	129		
Belyea et Adams 1990	20-25% E. Maïs							
	Foin luzerne		17,6	17,8	33,5	117	V. laitières	
	Maïs grain			15,3	28,0	114	Holstein	
Dinn et al. 1998	Ration complète	Témoin	18,3	23,7	34,2	264	Vaches laitières	Addition AA protégés contre dégradation ruminale via l'alimentation
	30% E. Herbe	Lys et Met protégé	16,7	22,3	32,8	195	Holstein	
	20% E. Maïs	Lys et Met protégé + urée	15,3	22,1	32,8	162		
	50% (orge + T. soja et colza)							
Susmel et al. 1995	55% Foin	Témoin	9,4	14,2	17,6	34	Vaches laitières	Voie alimentaire
	45% concentré:	20g urée/kg MS	12,7	14,5	21,0	72	Simmentales	
	Maïs grain							
	Orge	Stade lactation						
	Pulpes betteraves	J21-25	11,1	13,0	22,3	53		
		J47-51	11,2	14,3	20,2	49		
		J73-77	10,8	15,1	18,1	52		
Castillo et al. 2001b	E. Herbe	J99-103	11,0	15,1	16,6	58		
		Concentré commercial						
		21 ou 29% MAT						
		MAT basse	14,5	18,1	23,1	151	Vaches laitières	Voie alimentaire
		MAT haute	18,3	17,6	24,5	225	Holstein	
		Dégradabilité haute	16,7	17,7	23,8	219		
		Dégradabilité moyenne	16,4	17,9	23,4	184		
		Dégradabilité basse	16,2	17,9	24,1	162		
Castillo et al. 2001a	E. Herbe	Concentré						Voie alimentaire
		NDF élevé	13,7	16,1	20,7	96	Vaches laitières	
		Amid peu dégradable	13,3	16,0	20,1	87		
		Amid très dégradable	14,2	16,2	19,4	134	Holstein	
		Sucre soluble	14,3	16,0	19,4	97		

Taleau 4 suite: Excrétion azotée urinaire - Récapitulatif des conditions expérimentales des essais de la littérature

Référence	Ration base	Caractéristiques du traitement	MAT ration %	MSI kg/j	Lait kg/j	N urinaire g/j	Animaux	Conditions expérimentales
Fisher et al. 2000	Ration complète	Maïs grains	15,3	22,8	34,2	154	Vaches	Voie alimentaire
	50% E. Herbe	farines soja, maïs	16,4	21,8	35,0	180	laitières	
	50% E. Maïs	orge	12,3	20,8	31,5	92	Holstein	
Kebreab et al. 2000 Expérimentation 1	E. Herbe:							Voie alimentaire
	fertilisation haute	Pelets:	18,2	16,86	26,5	221	Vaches	
	fertilisation moyenne	farine soja +	18,5	17,82	28,3	217	laitières	
	Foin:						Holstein	
	non tardif/fertil haute	avoine	18,2	17,24	27,1	229		
	tardif/Fertil haute		18,3	16,48	25,8	213		
	non tardif/fertil moyenne		18,5	17,82	28,3	218		Voie alimentaire
	frais		17,6	17,3	26,6	220		
	fané		19,0	17,06	27,6	220		
	E. Herbe fané:							
	fertilisation haute		16,1	15,3	24,7	118	Vaches	
	fertilisation moyenne		15,7	16,3	25,5	105	laitières	
	non tardif / fertilisation haute		14,0	15,4	23,8	87	Holstein	
		Concentré:						Voie alimentaire
		amidon(avoine, blé)	14,9	15,8	24,8	94		
		fibres (mélasse)	15,5	15,6	24,5	113		
Expérimentation 3	E. Herbe avec additif:							
	bactérie		16,5	17,7	28,2	153	Vaches	
	acide normal		16,6	17,3	26,1	144	laitières	
	acide élevé		17,6	17,1	26,6	145	Holstein	
		concentré:						
		avoine	17,2	17,3	27,0	154		
Gonda et al. 1995	E. (Herbe+trèfle)			18,8	23,4	106	Vaches	Début lactation
	Foin	farine niveau bas		18,6	26,0	136	laitières	
	Farine de colza	farine traitée bas		18,6	24,2	114	Suédoises	
		farine traitée haut		18,5	26,8	131		
		farine niveau bas		15,1	16,3	104		Fin lactation
		farine niveau haut		15,7	18,1	134		
		farine traitée bas		16,7	19,9	104		
		farine traitée haut		17,8	22,4	143		
Wanjaiya et al. 1993	Trèfle blanc		22,9	13,1	12,6	251	V. laitières	Restriction 10%
	Trèfle+ E.Maïs		14,8	14,2	12,5	137	Frisonnes	

Figure 5: Distribution de l'azote ingéré entre l'urine et les fèces d'après les données de la bibliographie



◆ Wright et al. 1998	■ Volden 1999	▲ Van Vuuren et al. 1993	× Peyraud et al. 1997
× Choung et Chamberlain 1992	● Wilkerson et al. 1997	+ Belyea et Adams 1990	■ Dinn et al. 1998
- Susmel et al. 1995	□ Castillo et al. 2001b	■ Castillo et al. 2001a	△ Fisher et al. 2000
× Kebreab et al. 2000	◇ Gonda et al. 1995		

II.2. Facteurs de variation

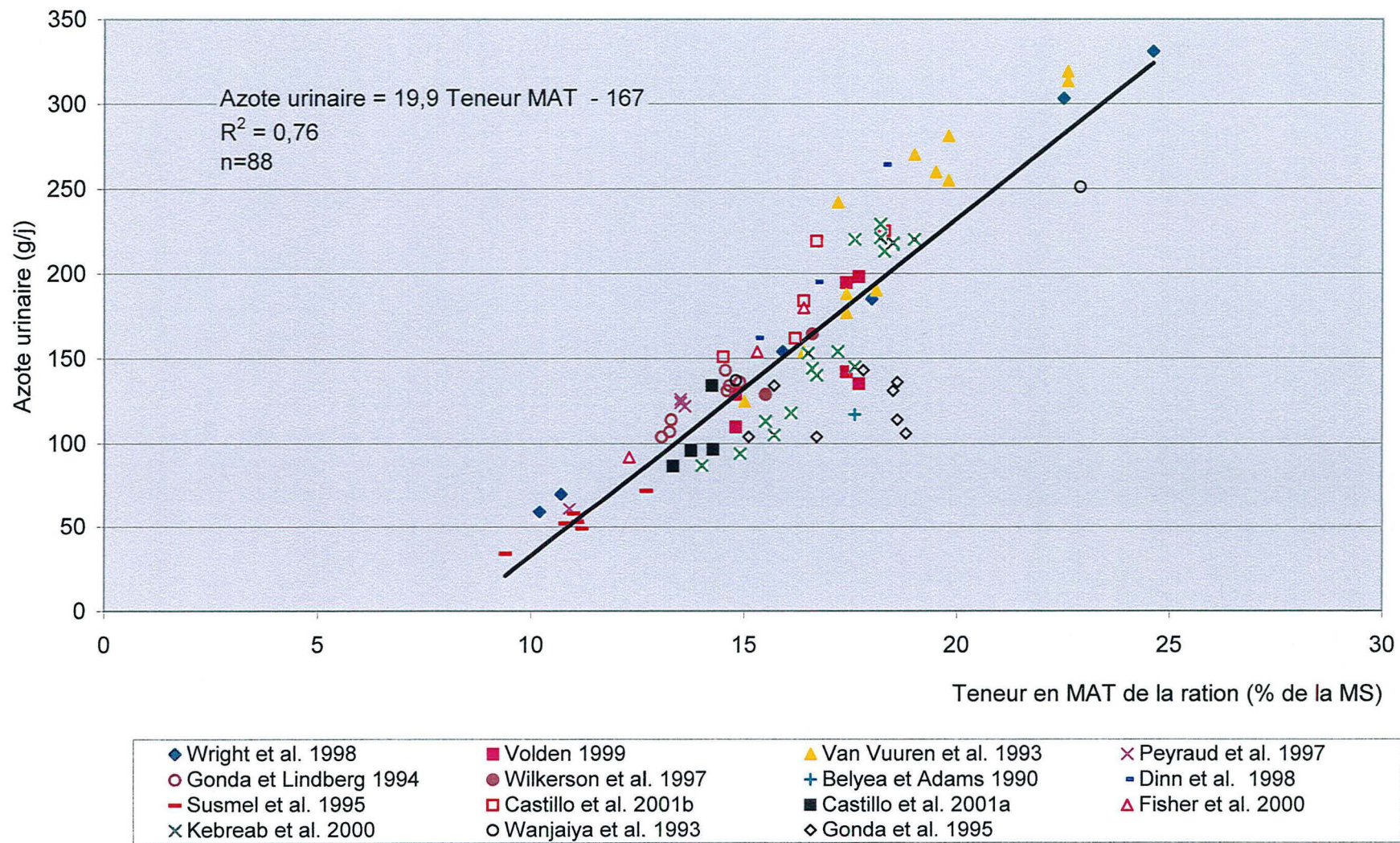
Les principaux facteurs faisant varier l'excrétion d'azote dans l'urine relèvent de l'alimentation (aspect quantitatif et qualitatif), et du métabolisme de l'azote absorbé (utilisation hépatique et recyclage). Ces différents aspects seront pris comme des facteurs individuels dans ce chapitre alors que leurs effets sont inévitablement en interactions.

II.2.1. Apports azotés (teneur et nature des sources protéiques)

La quantité journalière d'azote excrétée dans l'urine augmente linéairement avec la teneur en MAT de la ration ($r^2=0.76$, Figure 6). Les valeurs d'excrétion urinaire les plus élevées de la Figure 6 (supérieure à 250 g N/j) sont observées avec une alimentation composée uniquement ou principalement d'herbe (Van Vuuren *et al.*, 1993), de trèfle blanc frais seul (Wanjaiya *et al.*, 1993) ou d'ensilage de maïs complémentée avec des proportions importantes d'une source protéique peu dégradable dans le rumen (Wright *et al.*, 1998). A l'inverse, les valeurs faibles sont relevées pour les rations avec des teneurs en MAT faibles à base d'ensilage de maïs (Peyraud *et al.*, 1997), à base de foin avec ou sans apport en urée (Susmel *et al.*, 1995), ou des rations contenant des concentrations faibles en protéines peu dégradable dans le rumen (RUP) (Wright *et al.*, 1998). L'excrétion urinaire d'azote estimée par Berry *et al.* (2001) pour des vaches au pâturage indique également une tendance d'une excrétion urinaire d'azote croissante avec les apports en MAT.

La compilation de ces résultats fait apparaître que la teneur en MAT est un paramètre dont l'impact sur l'azote urinaire semble plus important que le niveau de fermentescibilité ruminale. Toutefois, l'excrétion urinaire d'azote augmente linéairement avec la teneur en concentré protéique peu dégradable au niveau du rumen (Wright *et al.*, 1998). Ainsi, l'azote urinaire augmente d'un facteur 5 pour des vaches nourries avec un supplément (29% de la MS) riche en protéines peu dégradables comparativement à des vaches recevant le même supplément en quantité moindre (4.5% de la MS) et ce alors que l'ingestion azotée augmente seulement d'un facteur 2.3 entre les deux traitements. De plus, l'augmentation d'un facteur 5 de l'azote urinaire est proche du facteur existant entre ces deux traitements (6.4). Pour Susmel *et al.* (1995), la présence d'urée dans la ration à hauteur de 20 g/kg MS entraîne une augmentation forte de l'excrétion urinaire d'azote (facteur 2) mais avec des valeurs qui restent faibles (72 contre 34 g N/j). Cette observation repose très probablement sur le fait que même en présence d'urée, la teneur en MAT de la ration reste faible (12.7%).

Figure 6: Azote urinaire en fonction de la teneur en Matière Azotée Totale de la ration d'après les données de la bibliographie



II.2.2. Quantité d'azote ingéré et taux de couverture des besoins azotés

La quantité d'azote ingéré et l'excrétion urinaire d'azote sont fortement liées ($r^2=0.71$) de façon linéaire entre 200 et 700 g N ingéré/j (Figure 7). Cette variable permet une explication de la variabilité de l'excrétion urinaire d'azote légèrement moins bonne que celle obtenue avec la teneur en MAT de la ration. Les ingestions en azote les plus élevées sont observées pour des régimes à fortes teneurs en MAT combinées à des proportions importantes de protéines peu dégradables au niveau du rumen (Wright *et al.*, 1998) et des rations à base d'un mélange d'ensilages d'herbe et de maïs (50%), d'orge et de tourteaux de colza et soja (50%) (Dinn *et al.*, 1998). Les valeurs d'azote urinaire les plus faibles correspondent à des situations d'ingestions faibles d'azote : de 214 à 302 g/j (Susmel *et al.*, 1995 ; Wright *et al.*, 1998).

La couverture des besoins azotés permet également une bonne prédiction (87%) de la variabilité de l'excrétion journalière d'azote dans l'urine (Figure 8). Toutefois, la majeure partie des références concerne une gamme de couverture élevée (100-170%). De même que pour la teneur en MAT de la ration, le taux de couverture azoté a une influence prépondérante par rapport à la dégradabilité des sources protéiques. En effet, l'urée qui constitue un apport hautement fermentescible en azote ne conduit pas à des excrétions urinaires particulièrement élevées lorsque le taux de couverture des besoins en azote est proche de 100% (Susmel *et al.*, 1995). Les protéines peu dégradables au niveau du rumen entraînent une excrétion urinaire importante lorsqu'elles sont combinées à une couverture des besoins de l'ordre de 200% (Wright *et al.*, 1998). Un tel niveau de couverture laisse suggérer que quelle que soit la nature des sources protéiques, il est fortement probable que l'excrétion urinaire soit élevée. Ces données de Wright *et al.* (1998) ont une forte influence sur la relation établie entre l'excrétion urinaire d'azote et le niveau de couverture des besoins azotés ; sans elles la tendance suit toujours la même relation avec un coefficient de détermination de 0.84.

II.2.3. Apports énergétiques

L'énergie représente un complément indispensable à l'azote pour que celui-ci puisse être valorisé. Son effet dépend de la nature du substrat énergétique (niveau de disponibilité). Une restriction alimentaire de 20% appliquée à la ration de base à laquelle sont ajoutés des apports variables (de 4.5 à 29% de la MS) en concentré de protéines peu dégradables dans le rumen, conduit à une excrétion azotée urinaire plus importante que lors d'une restriction alimentaire de 10% (Wright *et al.*, 1998). Les auteurs expliquent ce résultat par un apport insuffisant d'énergie disponible au niveau ruminal pour que l'azote y soit employé de façon efficace. L'hypothèse avancée de ces auteurs est surprenante car dans leurs conditions expérimentales,

Figure 7: Azote urinaire en fonction de l'ingestion d'azote d'après les données de la bibliographie

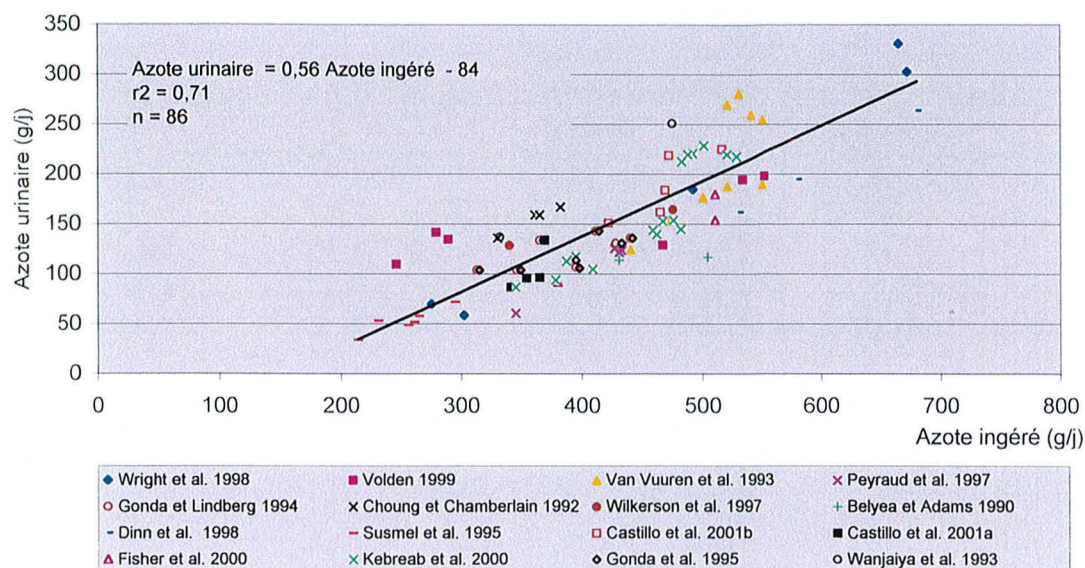
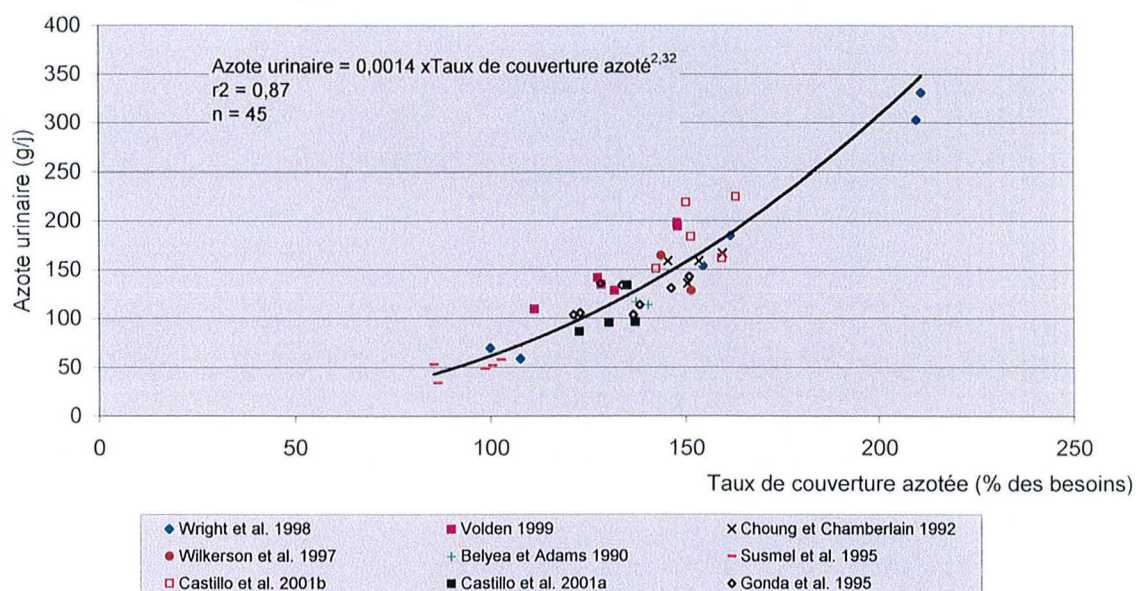


Figure 8: Azote urinaire en fonction du niveau de couverture des besoins azotés d'après les données de la bibliographie



la nature des protéines en supplément ne permet pas une grande disponibilité ruminale d'azote. L'ajout de sources énergétiques (maïs grain et blé) à des vaches au pâturage conduit à des diminutions de l'excrétion urinaire d'azote (94 contre 195 gN/j) et de la part de cette excrétion par rapport à l'azote ingéré (33.1 contre 46.3% de l'ingéré) (Berry *et al.*, 2001). L'excrétion azotée urinaire diminue lors d'apports croissants en énergie fermentescible, avec un impact d'autant plus important que le niveau d'ingestion est élevé (Kebreab *et al.*, 2002). Ces auteurs précisent que l'apport supplémentaire en énergie fermentescible permet une utilisation accrue de l'azote par les micro-organismes du rumen et une réduction des pertes d'ammoniac, ce qui se répercuteraient principalement sur l'excrétion urinaire comme Norton *et al.* (1982a) et Wright *et al.* (1998) l'ont suggéré.

Le recyclage d'urée nécessite des apports d'énergie (Giráldez *et al.*, 1997). En effet, la disponibilité en énergie concourt à réguler l'intensité du recyclage d'urée que ce soit au niveau du rumen ou du colon. Ainsi pour des conditions d'urémie élevée, l'énergie disponible dans le compartiment fermentaire favorise, si elle est excédentaire par rapport à l'azote disponible à ce niveau, un recyclage de l'urée circulante. Le système PDI (Vérité *et al.*, 1987) permet la prise en compte des pertes ruminales d'azote en réduisant l'absorption d'ammoniac et en optimisant le recyclage d'urée. Ce principe nécessite la mise en place d'un équilibre des apports azotés et énergétiques aux micro-organismes en tenant compte de la capacité des ruminants à recycler l'urée, ceci afin d'optimiser l'utilisation des apports alimentaires d'azote fermentescible. Ainsi, un déficit des apports en protéines digestibles dans l'intestin quand l'azote fermentescible est limitant (PDIN) par rapport aux protéines digestibles dans l'intestin quand l'énergie fermentescible est limitante (PDIE), traduisant un déficit d'azote fermentescible par rapport à l'énergie peut être mis en place (jusqu'à 8 g par Unité Fourragère Lait (UFL) pour des vaches en production). En effet l'animal le tolère c'est à dire sans que l'ingestion, la production et le poids ne sont pas réellement affectés. De plus, un apport supplémentaire d'énergie aux micro-organismes du colon conduit à une diminution des pertes azotées endogènes via l'urine et à une augmentation des pertes fécales endogènes (Giráldez *et al.*, 1997).

II.2.4. Absorption de l'ammoniac

A un pH ruminal de 6, la quasi-totalité de l'ammoniac (99.9%) est sous forme d'ammonium (Rémond *et al.*, 1996). La part relative de la forme ionisée diminue lorsque le pH se rapproche de la neutralité. Mooney et O'Donovan (1970) ont montré une diffusion passive du NH_3 libre au travers de la paroi ruminale tandis qu'une quantité faible mais

significative de NH_4^+ est capable de la traverser (Siddons *et al.*, 1985). Toutefois, l'efficacité du transport du NH_4^+ n'a pas été démontrée (Rémond *et al.*, 1996) ; la faible solubilité de la forme ionisée dans les lipides de la membrane pourrait en être la cause.

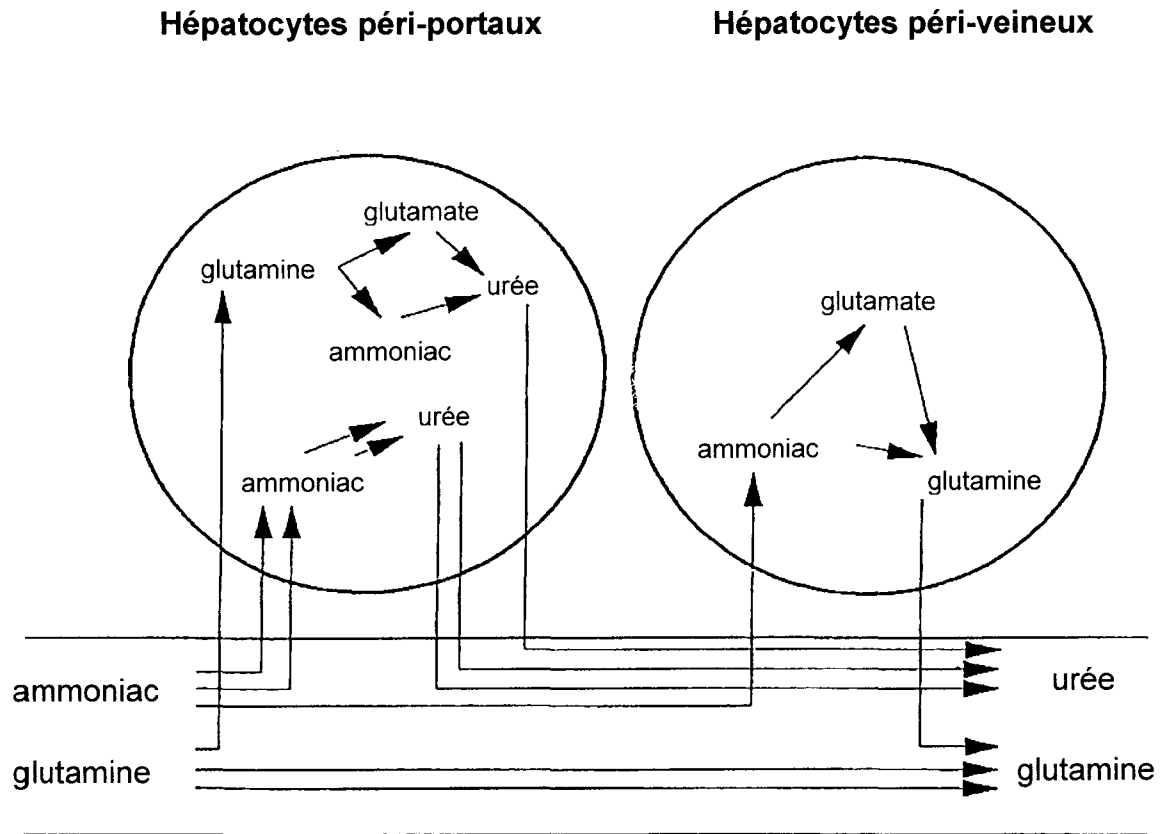
Reynolds *et al.* (1988) indiquent une absorption d'ammoniac à hauteur de 47% de l'azote ingéré chez la vache laitière. Il est reconnu depuis plusieurs décennies que la forme de transport sanguin de l'ammoniac est l'acide glutamique ou aspartique selon les réactions de transamination ou désamination qui peuvent avoir lieu au niveau de la paroi du rumen. L'ammoniac présent dans le sang portal des vaches peut provenir de l'absorption intestinale (intestin grêle) à raison de 27 à 51% (Parker *et al.*, 1995). L'ammoniac absorbé au niveau ruminal et non recyclé sous forme d'urée conduit à des pertes azotées via l'urine. Huntington et Archibeque (1999) estiment les pertes irréversibles d'ammoniac au niveau du rumen à partir de l'azote ingéré par une relation linéaire : pertes irréversibles (g/j) = $3.829 + 0.507 \times \text{N ingéré (g/j)}$ ($r^2 = 0.85$).

II.2.5. Synthèse hépatique d'urée

L'azote excédentaire présent dans l'organisme est transformé au niveau du foie en urée, molécule non chargée et hydrosoluble que le rein extrait du sang avant son excrétion dans l'urine. Les hépatocytes peuvent être classés en deux catégories : les hépatocytes péri-portaux et les hépatocytes péri-veineux (Van der Walt, 1993). Ces deux types cellulaires se distinguent par leur contenu enzymatique. Ainsi, les hépatocytes péri-portaux renferment préférentiellement la glutaminase et les enzymes du cycle de l'urée, alors que au niveau des hépatocytes péri-veineux se situe davantage la glutamine synthétase (Haussinger *et al.*, 1985 ; Guder *et al.*, 1987). En conséquence, l'ammoniac d'une part et la glutamine d'autre part seraient convertis en urée du côté de la veine porte, alors que la glutamine serait synthétisée à partir de l'ammoniac circulant du côté veineux (Figure 9). A partir des données de la bibliographie, Van der Walt (1993) estime la production d'urée par le foie des ruminants entre 1.41 et 5.93 g N/j/kg de poids métabolique, soit entre 183 et 771 g N uréique/j pour une vache d'un poids vif de 650 kg. Huntington et Archibeque (1999) considèrent que la capacité du foie à remplir ces fonctions de détoxification est rarement dépassée. Ils indiquent une production entre 259 et 386 g N uréique/j pour des ingestions d'azote de 380 et 480 g/j chez la vache laitière avec une corrélation forte ($r^2 = 0.96$) entre ces deux paramètres.

Cette production serait, en partie, le reflet des niveaux de prélèvement d'AA et d'ammoniac dans le sang. Le niveau de production d'urée observé par Van der Walt (1993) est 2 à 3 fois plus élevé que ce que les niveaux de prélèvements des AA et de l'ammoniac

Figure 9 : Cycle de l'urée dans le foie des ruminants (Haussinger *et al.*, 1985)



permettent d'envisager. Ainsi, l'azote contenu dans l'urée synthétisée au niveau hépatique serait pour 55 à 65% issu de l'ammoniac absorbé (Lobley *et al.*, 1995). Dans ces conditions, les apports complémentaires pour cette synthèse pourraient provenir de peptides absorbés au niveau intestinal. Par ailleurs, les protéines endogènes peuvent intervenir de façon non négligeable dans le turnover de l'urée et des AA, même si leur participation est difficilement quantifiable. Une situation de jeûne (6 jours) chez la vache laitière, conduit à une augmentation de la néoglucogenèse AA-dépendante avec une extraction hépatique des AA passant de 0.36 à 1.72 mmol/min (Lomax et Baird, 1983). Globalement, il peut être considéré que chez les ruminants l'azote urinaire est principalement dû à un excès des apports en azote dégradable par rapport aux besoins des micro-organismes et/ou à un excès ou un déséquilibre des apports en AA par rapport aux besoins de l'animal (Vérité et Delaby, 2000).

L'apport de rations riches en protéines occasionne une augmentation de la dégradation de certains AA par le foie en raison de la stimulation d'activités enzymatiques spécifiques, par exemple la désamination de la Thréonine par la Thréonine-Sérine déshydratase (Guinard et Rulquin, 1994b). Ceci confirme les observations rapportées par Van der Walt (1993) montrant une utilisation hépatique quasi-linéaire des AA totaux lorsque la quantité d'azote ingéré augmente. Cet effet avait déjà été observé par Lobley (1992) sous la forme d'un catabolisme hépatique accru lors d'un apport en azote élevé (couverture des besoins azotés de production contre couverture des besoins d'entretien).

La disponibilité en énergie au niveau hépatique intervient dans la régulation du niveau d'utilisation des AA absorbés. Deux des acides gras volatils (AGV) majeurs, le propionate et le butyrate, sont des activateurs de l'uréogénèse dans des hépatocytes isolés de moutons pour un apport fixe en ammoniac dans le milieu (1.5 mmol/L) (Demigné *et al.*, 1991). Ce résultat permet de supposer que la synthèse d'urée pourrait souvent être limitée par les apports en énergie. *In vivo*, cette activation de la synthèse de l'urée pourrait se produire à partir des réserves énergétiques ou des intermédiaires du cycle de l'urée. Ainsi, il peut être envisagé qu'une partie de l'énergie issue du catabolisme hépatique des AA ne soit pas disponible pour l'organisme mais utilisée pour la synthèse d'urée.

II.2.6. Recyclage d'azote

Le recyclage d'azote engendre également des modifications dans l'excrétion urinaire d'azote. En effet, une partie de l'urée circulante peut être recyclée par l'organisme, et ainsi ne pas être rejetée dans l'urine. Ce recyclage apparaît bénéfique pour l'animal car les micro-organismes du rumen sont capables de valoriser cette forme d'azote pour la synthèse de leurs

protéines. Cela conduit donc à la valorisation d'azote non protéique de façon indirecte par l'animal. Les données disponibles dans la littérature sur le recyclage d'azote sont peu fréquentes de manière générale et en particulier en ce qui concerne la vache laitière. Les données obtenues pour d'autres ruminants seront présentées de façon à fournir quelques indications.

II.2.6.1. Recyclage salivaire

Le recyclage salivaire est mis en évidence par le fait que les concentrations en urée du milieu ruminal sont très élevées par rapport au transfert prévisible par le gradient de concentration (Rémond *et al.*, 1993a). De plus, les flux d'urée sont variables au cours du repas (Rémond *et al.*, 1996). La sécrétion salivaire est de 2.2 g N/j chez des béliers castrés alimentés par 1 kg de pellet d'herbe/j, et de 1.4 g N/j pour une alimentation composée de 700 g/j de pellets et de 300 g de flocons d'orge (Norton *et al.*, 1982a). Seuls 33 à 45% de l'azote salivaire sont sous forme d'urée (Norton *et al.*, 1982a). La concentration en urée salivaire est fortement corrélée à la concentration en urée plasmatique, 98% de la variation de la concentration en urée salivaire étant expliquée par ce paramètre (Norton *et al.*, 1982a). Guilloteau *et al.* (1995) estiment cette part variable en moyenne entre 30 et 60% de la totalité du recyclage.

II.2.6.2. Recyclage ruminal

Un recyclage de l'azote au niveau ruminal a été démontré par une diffusion de l'urée du sang vers le rumen (Simmonet *et al.*, 1957). Les flux d'urée au travers de l'épithélium ruminal sont proportionnels au gradient de concentration sang – rumen ; le transfert de l'urée a lieu par diffusion passive (Haupt et Haupt, 1968). Ce transfert est évalué chez le mouton à 1.35 – 2.45 g d'N/j par Norton *et al.* (1982a) et à 2.1 g d'N/j par Rémond *et al.* (1993a). L'activité d'uréase initiée par les bactéries peut être associée à la paroi comme au milieu ruminal ; ces deux sources d'activité uréase sont considérées comme similaires (Rémond *et al.*, 1993b). La dégradation de l'urée par cette voie permet le maintien du gradient, ce qui favorise le flux d'urée vers le rumen. L'urée traversant la paroi ruminale peut représenter 59 à 83% de la totalité de l'urée entrant dans le compartiment (Norton *et al.*, 1982a).

II.2.6.3. Recyclage total au niveau du rumen

La différence entre le flux intestinal d'azote et l'azote ingéré reflète le gain net au niveau du rumen (Peyraud *et al.*, 1997a). Le recyclage de l'urée permet aux ruminants de tolérer un déficit des apports azotés par rapport aux apports énergétiques (différence PDIN-PDIE négative). Selon Peyraud *et al.* (1997a), un déficit de 17 g (pour une ration à 0.93UFL/kg MS) est toléré. Cette situation correspondrait à la limite d'adaptation des animaux producteurs puisque les quantités d'azote uréique exportées dans l'urine et l'urémie sont très faibles. La quantité nette d'azote recyclé par les vaches laitières est estimée jusqu'à 110 g/j avec un tel déficit alors qu'elle est d'environ 30 g/j dans une situation d'équilibre entre les apports PDIN et PDIE (Peyraud *et al.*, 1997a).

II.2.6.4. Recyclage intestinal

Chez le bélier, un tiers de l'azote endogène circulant au niveau du tractus gastro-intestinal correspond à de l'azote ayant traversé la paroi intestinale (Várady et Fejes, 1987). Selon ces auteurs, les 4/5^{ème} de cet azote pourraient être à nouveau absorbés. L'urée recyclée au niveau intestinal chez la vache représente entre 30 et 40% de l'azote digéré (Lapierre et Lobley, 2001). Selon ces auteurs, 50% de l'urée recyclée conduiraient à la production d'AA qui pourraient être réabsorbés au niveau proximal principalement. La participation importante du gros intestin dans le recyclage de l'azote est appuyée par le fait qu'il participe pour près de 40% au transfert net d'azote du tube digestif aux liquides corporels alors qu'il est reconnu que ce compartiment apporte peu d'AA à l'animal (Tisserand et Demarquilly, 1995).

II.2.6.5. Intensité du recyclage

Pour Huntington et Archibeque (1999), la production d'urée, son excrétion et le recyclage intestinal sont à relier à la composition de la ration, au niveau d'ingestion et aux capacités de production de l'animal. Ces auteurs indiquent des gammes de recyclage très larges : 19 à 96% de la production endogène d'urée peuvent être recyclés, entre 15 et 94% du recyclage a lieu par la salive, et 25 à 90% de l'urée dégradée l'est au-delà du rumen. Peu après Lapierre et Lobley (2001) indiquent des valeurs plus précises : 33% de l'azote issu de la synthèse hépatique d'urée sont excrétés par l'urine et 67% sont redistribués à différents niveaux du tractus digestif (Figure 10). Parmi l'azote redistribué, 10% sont excrétés via les fèces, 40% sont réabsorbés directement sous forme d'ammoniac et 50% sont réabsorbés comme une source d'azote anabolique et principalement en tant qu'AA.

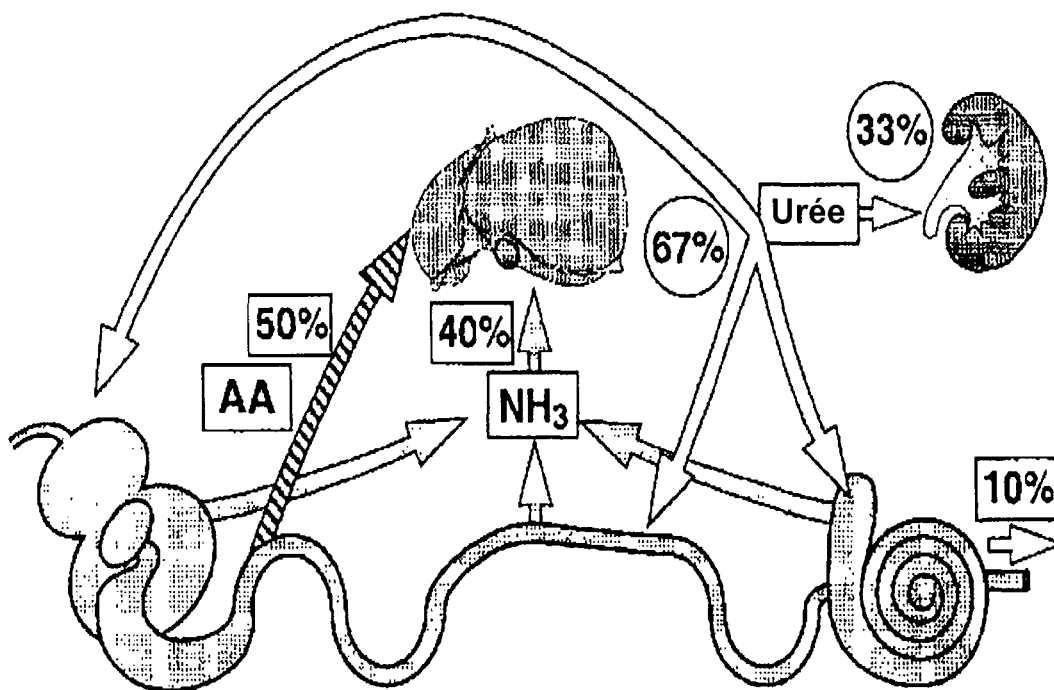


Figure 10 : Le recyclage d'urée (Lapierre et Lobley, 2001)

Les valeurs entourées d'un cercle représentent les fractions de la synthèse hépatique d'urée destinées à l'excrétion urinaire ou à l'entrée dans l'intestin. Les valeurs entourées d'un rectangle représentent les fractions de l'urée entrée dans l'intestin qui sont excrétées dans les fèces, qui retournent au cycle hépatique de l'ornithine sous forme d'ammoniac ou qui sont converties en produit anabolique (principalement des AA).

II.2.7. Urémie

Le pool circulant d'urée est la conséquence à la fois de l'absorption ruminale d'ammoniac, de la désamination hépatique des AA et du recyclage. Les valeurs d'urée plasmatiques maximales, chez des vaches taries et lactante, sont observées 2 à 3 heures après le repas du matin (Ndibualonji *et al.*, 1997). Toutefois, les variations de concentration restent modérées au cours de la journée (+3.6 mg N uréique/dL plasma entre les valeurs extrêmes) pour des vaches recevant un même traitement conduisant à des valeurs proches de 14 mg N uréique/dL plasma (Ndibualonji *et al.*, 1997). Ainsi, la comparaison de données d'études différentes peut être envisagée même si les temps de mesures après le repas sont variables entre ces études (mesures en cinétique ou ponctuelles).

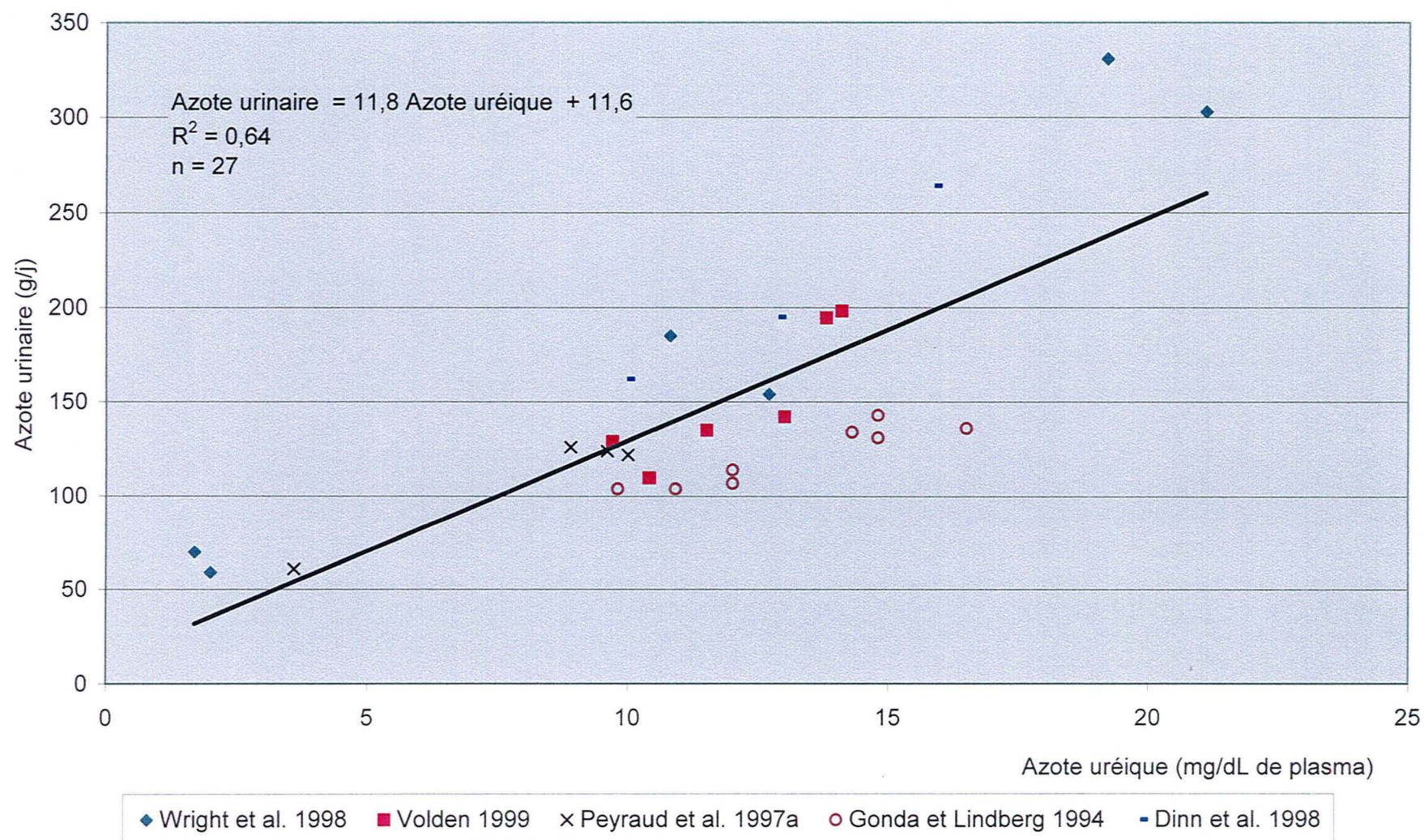
Les valeurs d'urémie recensées dans la littérature depuis le début des années 1990 s'échelonnent entre 2 et 23 mg d'azote uréique/dL de plasma. Les variations de la concentration en azote uréique du plasma permettent de prédire 64% de la variabilité de l'excrétion urinaire d'azote (Figure 11). Cette relation et son coefficient de détermination appuient les travaux d'Al-Dehneh *et al.* (1997) qui ont observé avec des vaches en lactation, un passage dans l'urine de 65% de la dose de ¹⁵N-urée injectée (infusion continue 72h) dans la veine jugulaire. La relation linéaire est établie principalement par les points extrêmes. Elle est beaucoup moins évidente pour la gamme d'azote uréique comprise entre 8.9 et 16.5 mg/dL de plasma. L'existence de cette relation est montrée par Dinn *et al.* (1998), Wright *et al.* (1998) et Volden (1999) alors que les observations de Gonda et Lindberg (1994) et Peyraud *et al.* (1997a) ne la montrent pas.

L'urémie est un facteur intéressant en terme de prédiction de l'excrétion urinaire d'azote mais elle constitue une variable observée sur laquelle il n'est pas possible d'agir directement. Par conséquent, elle ne peut pas intervenir si l'objectif est de contrôler l'excrétion urinaire d'azote.

II.3. Conclusion : éléments d'une loi de réponse

L'excrétion urinaire représente une voie d'élimination de l'azote circulant qui évite qu'il ne se trouve en trop forte concentration, risquant d'être néfaste au fonctionnement de l'organisme. Les résultats repris dans cette synthèse bibliographique concernent des excrétions urinaires comprises entre 50 et 350 g N/j. Les paramètres clefs permettant la prédiction des variations d'azote urinaire produit sont ceux qui sont caractéristiques du niveau d'apports azotés : la teneur en MAT de la ration, le taux de couverture des besoins en azote ou la quantité d'azote ingéré. D'autres variables peuvent être également impliquées comme le

Figure 11: Azote urinaire en fonction de l'azote uréique du plasma sanguin d'après les données de la bibliographie



niveau de fermentescibilité des protéines et de l'énergie, l'intensité du recyclage et la capacité de l'animal à valoriser les apports.

La compilation de l'ensemble des données recensées permet d'établir des équations de prédiction de l'excrétion urinaire pour les gammes 10-25% MAT dans la MS de la ration et 200-700 g d'azote ingéré/j. A partir de la seule teneur en MAT de la ration, 75% des variations d'excrétion urinaire d'azote peuvent être prédites :

$$1) \text{ N urinaire (g/j) } = -160 + 19.4 \times \text{MAT de la ration (\%)}$$

$$(r^2 = 0.75 ; \text{ETR} = 33 ; n = 88)$$

L'introduction de la variable N ingéré permet d'améliorer la précision de la prédiction. Les variables sont suffisamment indépendantes pour être significatives au seuil de 5% :

$$2) \text{ N urinaire (g/j) } = -166 + 11.6 \times \text{MAT de la ration (\%)} + 0.3 \times \text{N ingéré (g/j)}$$

$$(r^2 = 0.84 ; \text{ETR} = 37 ; n = 88)$$

Ces équations ont été établies à partir de résultats obtenus avec des pratiques alimentaires conduisant à une couverture excédentaire (voire largement excédentaire) des besoins en azote et avec fréquemment peu d'informations sur la quantité d'énergie apportée par les rations. De plus, la prise en compte du recyclage d'azote dans le but de diminuer l'excrétion azotée urinaire est rarement réalisée.

III. Facteurs de variation de l'azote du lait

III.1. L'azote du lait

La matière azotée du lait est composée en moyenne de 95% d'azote protéique et 5% d'azote non protéique. Cette dernière fraction est composée principalement d'urée mais contient également des AA libres, de la créatine, de l'acide urique, de la créatinine et de l'ammoniac ... (Tableau 5).

Les AA circulant dans le sang sont absorbés par les cellules alvéolaires de la mamelle en vue de synthétiser les protéines du lait. Ils sont principalement issus du plasma et, de façon mineure, des globules rouges (Mackle *et al.*, 2000). Le transport des AA s'effectue au niveau de la membrane basale des cellules de l'épithélium (Maas *et al.*, 1997). Le prélèvement des AA essentiels (AAE) par la glande mammaire est supérieur à leur sécrétion sous forme de protéines dans le lait, à l'exception de la méthionine. Inversement, la sécrétion de la plupart

Tableau 5: Composition de l'azote non protéique du lait de vache

Composants	Teneur en mg /L		Part de l'ANP en %
	Vignon, 1976 Synthèse de 22 expérimentations	lenness et Sloar 1970	Vignon, 1976 Synthèse de 22 expérimentations
ANP	178 - 662		
N-Urée	175 - 579	180	
N-AA libres	59 - 207	60	
N-Créatine	24 - 114	40	7 - 9
N-Créatinine	2 - 12	5	0,8 - 2,6
N-Ammoniac	1 - 20	7	1 - 3
N-Acide urique	6 - 50	23	2 - 3
N-Acide orotique	38 - 71	67	2 - 5
N-Nucléotides	1 - 25		
N-Nitrates	0,3 - 15		0,5
N-Vitamines			0,3

des AA non essentiels (AANE) est plus élevée que leur prélèvement ; ceci permet de supposer une synthèse de ces AA par la glande mammaire (Maiga et Schingoethe, 1997). La quantité d'azote sécrété dans le lait est très variable, comprise entre 60 et 180 g N/j pour les résultats référencés (Figure 12). Les protéines sécrétées ont une composition déterminée par le génome. Ainsi, la nature et la quantité des AA circulants constituent des éléments essentiels dans le processus de la synthèse protéique par la mamelle.

D'après les données bibliographiques, l'urée représente une fraction très variable de l'ANP (de 33 à 79%). Clark et al. (1978) ont avancé que l'urée du lait proviendrait principalement d'un transfert passif d'urée du sang. Ceci est appuyé par le fait que les variations de concentration en urée dans le lait seraient majoritairement influencées par la concentration en urée du plasma (Gustafsson et Palmquist, 1993). Toutefois, la glande mammaire synthétise de l'urée lors du catabolisme des AA (Metcalf *et al.*, 1996). Pour ces auteurs, cette part d'urée est 170 fois moins élevée que celle d'origine sanguine dans l'urée totale recueillie dans le lait qui est comprise entre 185 et 350 mg/kg.

III.2. Facteurs de variation

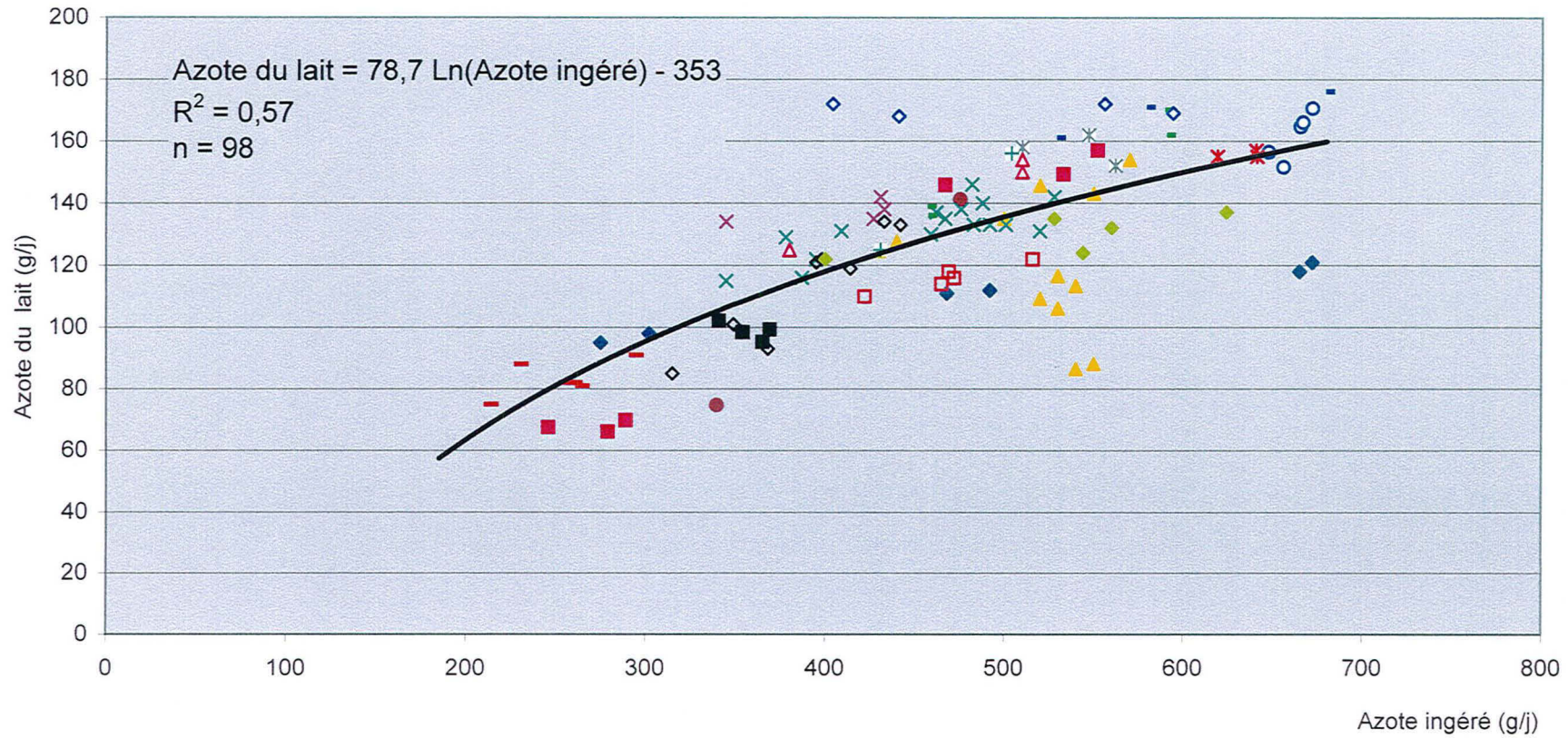
Les conditions expérimentales des données bibliographiques citées dans cette partie sont répertoriées dans le Tableau 6.

III.2.1. Apports azotés alimentaires

III.2.1.1. Teneur en MAT de la ration, ingestion d'azote et taux de couverture des besoins azotés

La teneur en MAT de la ration n'est pas un bon paramètre d'estimation de la quantité d'azote sécrété dans le lait ($r^2=0.08$). En revanche, la quantité d'azote ingéré constitue un bon indicateur, selon une relation logarithmique, pour la gamme 200-700 g N ingéré/j ($r^2=0.57$, Figure 12). Ceci peut s'expliquer par le fait que les apports sont très fréquemment (hors conditions particulières d'expérimentation) établis pour répondre à la production attendue. Même si l'efficacité de conversion en protéines du lait est évaluée à 10% pour les protéines ingérées par Metcalf *et al.* (1994 et 1996) et 24.4% pour les AA absorbés par Maas *et al.* (1998), les données relevées dans la littérature (Tableau 6) indiquent une part minimale de l'azote ingéré recueilli dans les protéines du lait de 20% pour un régime dont les teneurs en MAT et en protéines peu dégradables dans le rumen sont importantes (Wright *et al.*, 1998) et une part maximale de 40% pour un régime dont les teneurs de ces mêmes paramètres sont

Figure 12: Azote secrété dans le lait en fonction de l'azote ingéré d'après les données de la bibliographie



◆ Wright et al. 1998	○ Maija et Schingoethe 1997	■ Volden 1999	▲ Van Vuuren et al. 1993	× Peyraud et al. 1997a
× Dhiman et Satter 1997	× Piepenbrink et al. 1998	● Wilkerson et al. 1997	+ Belyea et Adams 1990	■ Dinn et al. 1998
- Susmel et al. 1995	□ Castillo et al. 2001b	■ Castillo et al. 2001a	△ Fisher et al. 2000	× Kebreab et al. 2000
- Rodriguez et al. 1997	◇ Gonda et al. 1995	◆ Roseler et al. 1993	◆ Frank et al. 2002	

Tableau 6: Azote du lait - Récapitulatif des conditions expérimentales pour les différents essais de la littérature

Référence	Ration base	Caractéristiques du traitement	MAT %	Ration UFL /kgMS	RUP %MS	MSI kg/j	Lait kg/j	N lait g/j	Matière protéique g/j	Animaux	Conditions expérimentales
Wright <i>et al.</i> 1998	60% E. Maïs 35% Maïs	Farines animales et blé	10,2			18,5	23,4	98	709	Vaches laitières Holstein	Restriction alimentaire
			15,9			18,4	25	111	790		restriction 10%
			22,5			18,7	26,7	121	849		
			10,7			16,1	22,4	95	690		
			18,0			17,0	26,4	112	810		restriction 20%
			24,6			16,9	26,3	118	828		
Maija et Schingoethe 1997	Ration complète 25% E. Maïs 25% Foin de luzerne 50% concentré	contrôle bypass protéines molasse + bypass prot. bypass prot. + matière grasse molasse + bypass + mat. grasse	18,9	0,97	7,0	22	33,3	165	1029	Vaches laitières Holstein	Voie alimentaire
			19,0	0,97	8,6	21,3	32,8	156	977		
			19,0	0,96		22,1	35,9	171	1066		
			19,2	1,02		21,7	36,4	166	1037		
			18,8	1,01		21,8	33,6	152	948		
Volden 1999	Ration complète 40% E. Maïs 60% concentré	Dégradabilité basse Dégradabilité haute Dégradabilité basse	17,7			19,5	31,5	157	980	Vaches laitières Norvégiennes	Niveau d'ingestion haut
			17,4			19,1	30,0	149	933		
			14,8			19,7	29,4	146	911		
		Dégradabilité basse Dégradabilité haute Dégradabilité basse	17,7			10,2	13,1	70	436		Niveau d'ingestion bas
			17,4			10,0	13,0	66	413		
			14,8			10,4	13,1	67	422		
Van Vuuren <i>et al.</i> 1993	Expérimentation 1 Herbe seule + Amidon ou fibre					14,6				Vaches laitières Frissonnes Néerlandaises	Voie alimentaire
			16,4			16,8		128			
			15,0			17,9		125			
	Expérimentation 2 Herbe + E. Maïs ou Amidon ou Amidon + fibres ou Fibres										
			17,2			20,0		143			
			18,1			17,3		135			
			17,4			18,7		146			
			17,4			20,5		154			
	Expérimentation 3 herbe seule + pulpes betteraves ou + pulpes betteraves ensilées		22,6			14,9		86			
			19,5			17,0		117			
			19,8			16,7		106			
			22,6			15,2		88			
			19,8			16,4		109			
			19,0			17,8		113			
	Expérimentation 3 herbe seule + E. Maïs sans enveloppe ou avec enveloppe		22,6			15,2		88			
			19,8			16,4		109			
			19,0			17,8		113			
Peyraud <i>et al.</i> 1997a	67% E. Maïs 5% T. soja Blé, Maïs grain orge	Témoin urée urée/caséine caséine	10,9	0,93		19,8	26,6	134	813	Vaches laitières	Voie alimentaire
			13,5	0,92		19,8	27,3	135	834		
			13,5	0,93		20,0	28,4	138	835		
			13,6	0,93		19,8	28,4	142	841		

Tableau 6 suite: Azote du lait - Récapitulatif des conditions expérimentales pour les différents essais de la littérature

Référence	Ration base	Caractéristiques du traitement	MAT %	Ration UFL /kgMS	RUP %MS	MSI kg/j	Lait kg/j	N lait g/j	Matière protéique g/j	Animaux	Conditions expérimentales
Dhiman et Satter 1997	50% Fourrage/50% Conc.	Ration complète	17,5	0,98	5,8	20,9	31,1	152	958	Vaches	Voie alimentaire
	E. luzerne seul	Farines os et sang	16,5	0,98	5,6	21,4	32,4	162	1021	laitières	
	1/3 E. luzerne, 2/3 E. Maïs		15,7	0,98	5,5	21,1	31,4	158	1002	Holstein	
Piepenbrink et al. 1998	Ration complète	Farines diverses:	15,7	1,04	6,0	25,5	32,7	157	1014	Vaches	Voie alimentaire
	Foin de luzerne	Témoin (soja)	15,9	1,00	6,1	25,2	32,3	155	1017	laitières	
	E. Maïs	Canola meal (CM)				25,6	33,2	165	1072	Holstein	
	Maïs grain	CM + Lys et Met protégées	15,6	1,03	6,8	24,8	32,1	155	1011		
		Blood meal (BM)				24,3	32,4	162	1037		
Wilkerson et al. 1997	Synthèse		16,6			17,9	29,0	141	899	Vaches	Voie alimentaire
			15,5			13,7	13,8	75	469	laitières	
Belyea et Adams 1990	20-25% E. Maïs		17,6			17,8	33,5	156		Vaches	Voie alimentaire
	Foin luzerne					15,3	28,0	125		laitières	
Dinn et al. 1998	Ration complète										Addition AA protégés contre dégradation ruminale via l'alimentation
	30% E. Herbe	Témoin	18,3			23,7	34,2	176		Vaches	
	20% E. Maïs	Lys et Met protégé	16,7			22,3	32,8	171		laitières	
	50% (orge + T. soja et colza)	Lys et Met protégé + urée	15,3			22,1	32,8	161		Holstein	
Susmel et al. 1995	55% Foin	Témoin	9,4			14,2	17,6	75	481	Vaches	voie alimentaire
	45% concentré:	20g urée/kg MS	12,7			14,5	21,0	91	580	laitières	
	Maïs grain									Simmentales	
	Orge	Stade lactation									
	Pulpes betteraves	J21-25	11,1			13,0	22,3	88	563		
		J47-51	11,2			14,3	20,2	82	522		
Castillo et al. 2001b	E. Herbe	J73-77	10,8			15,1	18,1	82	521		Voie alimentaire
		J99-103	11,0			15,1	16,6	81	515		
		Concentré commercial									
		21 ou 29% MAT									
		MAT basse	14,5			18,1	23,1	110	737	Vaches	
		MAT haute	18,3			17,6	24,5	122	775	laitières	
Castillo et al. 2001a	E. Herbe	Dégradabilité haute	16,7			17,7	23,8	116	757	Holstein	Voie alimentaire
		Dégradabilité moyenne	16,4			17,9	23,4	118	773		
		Dégradabilité basse	16,2			17,9	24,1	114	738		
		NDF élevé	13,7			16,1	20,7	98	620	Vaches	
		Amidon peu dégradable	13,3			16,0	20,1	102	660	laitières	
		Amidon très dégradable	14,2			16,2	19,4	99	630	Holstein	
Fisher et al. 2000	Ration complète	Maïs grains	15,3			22,8	34,2	150	1033	Vaches	Voie alimentaire
	50% E. Herbe	farines soja, maïs	16,4			21,8	35,0	154	1047	laitières	
	50% E. Maïs	orge	12,3			20,8	31,5	125	885	Holstein	

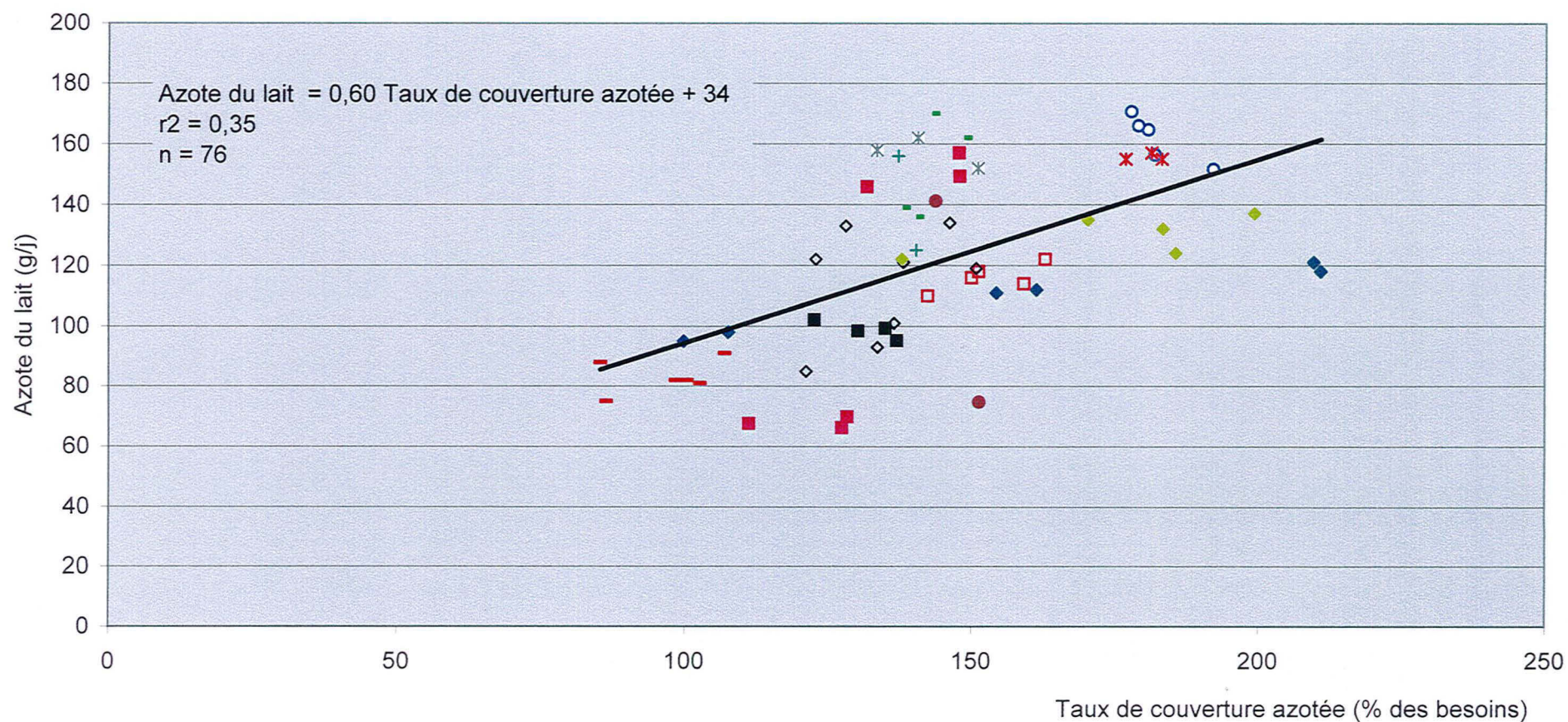
Tableau 6 suite: Azote du lait - Récapitulatif des conditions expérimentales pour les différents essais de la littérature

Référence	Ration base	Caractéristiques du traitement	MAT %	Ration UFL /kgMS	RUP %MS	MSI kg/j	Lait kg/j	N lait g/j	Matière protéique g/j	Animaux	Conditions expérimentales
Kebreab et al. 2000 Expérimentation 1	E. Herbe:										
	fertilisation haute	Pelels:	18,2			16,86	26,5	133	830	Vaches	Voie alimentaire
	fertilisation moyenne	farine soja +	18,5			17,82	28,3	142	940	laitières	
	Foin:	avoine								Holstein	
	non tardif/ fertil haute		18,2			17,24	27,1	133	840		
	tardif/ fertil haute		18,3			16,48	25,8	133	830		
	non tardif/ fertil moyenne		18,5			17,82	28,3	142	940		
	frais		17,6			17,3	26,6	140	830		
	fané		19,0			17,06	27,6	131	900		
	Expérimentation 2										
	E. Herbe Fané:									Vaches	Voie alimentaire
	fertilisation haute		16,1			15,3	24,7	122	810	laitières	
	fertilisation moyenne		15,7			16,3	25,5	131	870	Holstein	
	Non tardif / fertilisation haute		14,0			15,4	23,8	115	760		
		Concentré:									
		amidon (avoine, blé)	14,9			15,8	24,8	129	860		
		ou fibres (mélasse)	15,5			15,6	24,5	116	770		
	Expérimentation 3										
	E. Herbe avec additif:									Vaches	Voie alimentaire
	bactérie		16,5			17,7	28,2	135	958	laitières	
	acide normal		16,6			17,3	26,1	130	869	Holstein	
	acide élevé		17,6			17,1	26,6	146	901		
		concentré:									
		avoine	17,2			17,3	27,0	138	913		
		ou maïs	16,7			17,3	26,9	137	906		
Rodriguez et al. 1997	30% E. Maïs	Farine soja								Vaches	Voie alimentaire
	30% E. Herbe		15,9	0,91	4,6	23,2	32,3	170	1060	laitières	
	27% Maïs grain		16,0	0,92	6,5	23,1	33,2	162	1010	Holstein	
			15,9	0,91	4,6	18,0	22,5	139	870	Jersey	
			16,0	0,92	6,5	17,9	22,7	136	850	Jersey	
Gonda et al. 1995	E. (Herbe+trèfle)	farine niveau bas				18,8	23,4	122	782	Vaches	Voie alimentaire
	Foin	farine niveau haut				18,6	26,0	133	855	laitières	
	Farine de colza	farine traitée bas				18,6	24,2	121	784	Pie Rouge	
		farine traitée haut				18,5	26,8	134	858		
		farine niveau bas				15,1	16,3	85	543		Fin lactation
		farine niveau haut				15,7	18,1	93	588		
		farine traitée bas				16,7	19,9	101	647		
		farine traitée haut				17,8	22,4	119	748		
Roseler et al. 1993	Ration complète	T. Soja									Voie alimentaire
	47% E. Maïs	Farine viande	12,2	0,88		20,5	23,6	122	730	Vaches	
	18% E. Herbe	Farine sang	15,2	0,88		22,0	26,4	135	800	laitières	
	Maïs grain		15,5	0,88		21,8	24,4	124	730	Holstein	
			16,4	0,88		21,3	25,2	132	780		
Wanjaiya et al. 1993	Trèfle blanc		22,9			13,1	12,6	64		V. laitières	Restriction 10%
	Trèfle+ E. Maïs		14,8			14,2	12,5	66		Frisonnes	

faibles (Wright *et al.*, 1998). Ces résultats sont en accord avec les données relevées par Jonker *et al.* (1998) et Kauffman et St-Pierre (2001) lors de la formulation de leurs modèles prédictifs de la distribution de l'azote avec en moyenne des parts de l'azote ingéré sécrété dans le lait de 28 et 30%. L'efficacité d'utilisation des protéines alimentaires est plus importante lorsque les animaux sont alimentés avec des rations composées en partie d'ensilage de maïs : l'utilisation est de 33.5% (1/3 d'ensilage de luzerne et 2/3 d'ensilage de maïs) et de 31.5% (2/3 d'ensilage de luzerne et 1/3 d'ensilage de maïs) contre 29.5% pour les rations à base d'ensilage de luzerne (Dhiman et Satter, 1997). Dans ces travaux, l'introduction d'ensilage de maïs dans la ration s'accompagne d'une diminution du niveau azoté (environ un point d'écart entre les traitements successifs) sans que le niveau énergétique n'augmente. A même niveau énergétique, la ration qui apporte le moins de MAT engendre l'efficacité d'utilisation la plus élevée. Pour Metcalf *et al.* (1996), la valorisation marginale à un niveau de base d'environ 370 g N ingéré/j est estimée à 9% jusqu'à des valeurs de 85 g d'apport supplémentaire, et à 0% au-delà. Vérité et Delaby (2000) observent un rendement marginal de la valorisation de l'azote ingéré nul au-delà d'un apport de 105-110 g PDI/UFL. La teneur de 105 g PDIE/UFL représente une valeur seuil au-delà de laquelle l'accroissement des performances est minime alors que celui des pertes d'azote est important (Vérité et Delaby, 2000). Ainsi pour ces auteurs, le niveau de PDI de la ration constitue une voie de contrôle très importante en terme de production et de composition du lait mais aussi en matière d'ingestion et d'efficacité alimentaire.

Une couverture des besoins d'azote proche de 100% conduit à une sécrétion d'azote dans le lait de l'ordre de 60 à 100 g/j qui est fonction de la capacité de production de la vache (Figure 13). La quantité d'azote produite dans le lait augmente lorsque la couverture des besoins azotés est croissante et supérieure à 100% ($r^2 = 0.35$). La précision de la prédiction de l'azote du lait apparaît meilleure pour des taux de couverture proches de 100% par rapport à celles se rapportant à des niveaux de couverture aux environs de 200%. Pour une couverture des besoins en azote de 150%, la quantité d'azote fixé dans le lait est comprise entre 75 g N/j pour des vaches faibles productrices (14 kg de lait/j) (Wilkerson *et al.*, 1997), et 160 g N/j pour des vaches produisant plus de 32 kg de lait/j (Rodriguez *et al.*, 1997). Les écarts observés ne peuvent pas être attribués à la seule différence de niveaux de couverture car le potentiel de production est susceptible d'intervenir grandement dans la détermination de la quantité d'azote produite dans le lait. La Figure 14 met en évidence une valorisation de l'azote digéré sous forme d'azote sécrété dans le lait décroissante lorsque la couverture des besoins azotés augmente ($r^2 = 0.72$). Ainsi, la proportion de l'azote digéré qui est valorisée

Figure 13: Azote sécrété dans le lait en fonction du niveau de couverture des besoins en azote d'après les données de la bibliographie



◆ Wright et al. 1998	○ Maija et Schingoethe 1997	■ Volden 1999	* Dhiman et Satter 1997	✕ Piepenbrink et al. 1998
● Wilkerson et al. 1997	+ Belyea et Adams 1990	- Susmel et al. 1995	□ Castillo et al. 2001b	■ Castillo et al. 2001a
- Rodriguez et al. 1997	◇ Gonda et al. 1995	◆ Roseler et al. 1993		

dans le lait le plus efficacement (proche de 70%) est observée à partir du traitement témoin de Susmel *et al.* (1995) conduisant à la couverture de 85% des besoins en azote, et des apports bas en azote (10.5% de MAT en moyenne) de Wright *et al.* (1998) qui permettent la couverture de 104% des besoins. A l'inverse, le traitement apportant 23% MAT et enrichi en protéines peu dégradables de Wright *et al.* (1998) conduit à la valorisation d'à peine 25% de l'azote digéré pour une couverture de plus de 200%. Le niveau de couverture des besoins azotés peut permettre une prédiction de la sécrétion d'azote dans le lait mais la relation établie est purement mécanique dans le sens où la détermination de la couverture des besoins nécessite la connaissance de l'azote du lait.

III.2.1.2. Dégradabilité ruminale et digestibilité

La nature des sources protéiques alimentaires influe fortement sur l'ampleur de la fixation de l'azote dans le lait : pour des niveaux similaires et élevés d'ingestion d'azote (650-680g N/j) (Figure 12), les valeurs obtenues avec des rations riches en protéines peu dégradables dans le rumen (29% de la MS d'un supplément riche en RUP) sont relativement faibles (120 g N dans le lait/j) (Wright *et al.*, 1998) en comparaison de la sécrétion observée avec des rations moins riches (7-9%) en protéines peu dégradables (jusqu'à 170 g N dans le lait/j) (Maiga et Schingoethe, 1997). Dans une synthèse récente, Lapierre et Lobley (2001) considèrent qu'une source protéique peu dégradable conduit à une proportion plus élevée d'azote absorbé sous forme d'AA, une synthèse d'urée plus faible accompagnée d'une sécrétion de protéines dans le lait plus importante. Les rations utilisées par Wright *et al.* (1998) conduisent à des fortes augmentations de la teneur en MAT alors que les apports en énergie sont quasi-stationnaires. Les valeurs faibles de sécrétion azotée dans le lait sont observées avec : 1) des rations présentant des apports faibles et déséquilibrés en PDI : 85 à 90 g PDIE et 60 à 80 g PDIN/kg MS avec un déficit systématique des PDIN allant jusqu'à 27 g/kg MS (Susmel *et al.*, 1995) ou des rations de différents niveaux de MAT (de 14.8 à 17.7%) avec des dégradabilités ruminales des protéines faibles (de 4.8 à 6.9%) (Volden, 1999) ; 2) des vaches ayant une production faible (Wilkerson *et al.*, 1997).

La quantité d'azote apparemment digéré explique 41% de la variabilité de la sécrétion de l'azote dans le lait selon une relation linéaire (Figure 15). Ainsi, la corrélation entre l'azote du lait et l'azote ingéré est plus importante que celle avec l'azote digéré. Pour les niveaux d'azote digéré proches de 500 g/j, les parts de l'azote digéré recueillies dans le lait obtenues avec des rations riches en protéines peu dégradables dans le rumen sont plus faibles (24%)

Figure 14: Part de l'azote digéré secrétée dans le lait en fonction du niveau de couverture des besoins en azote d'après les données de la bibliographie

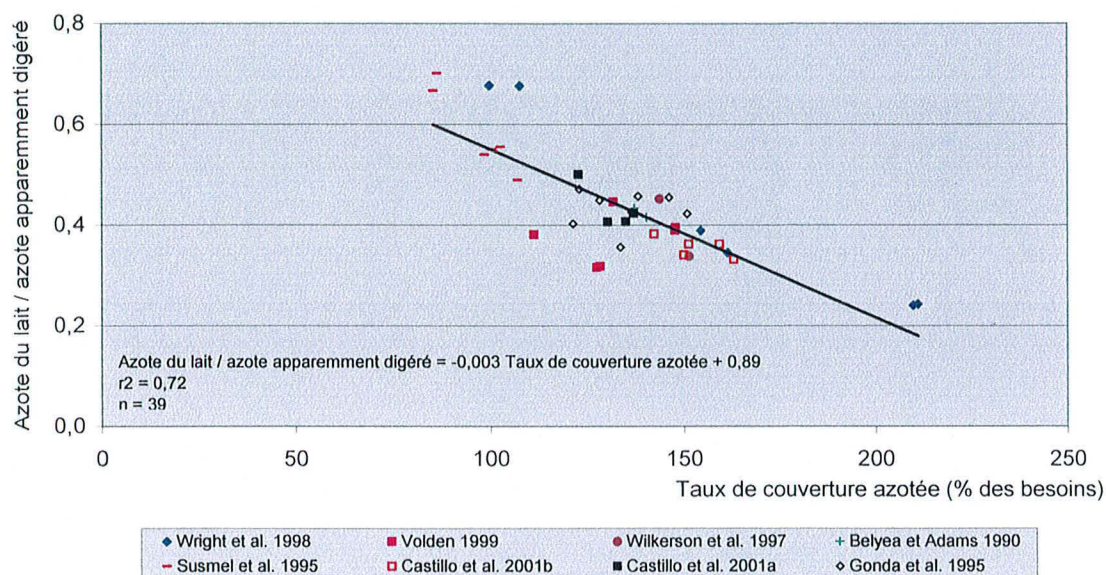
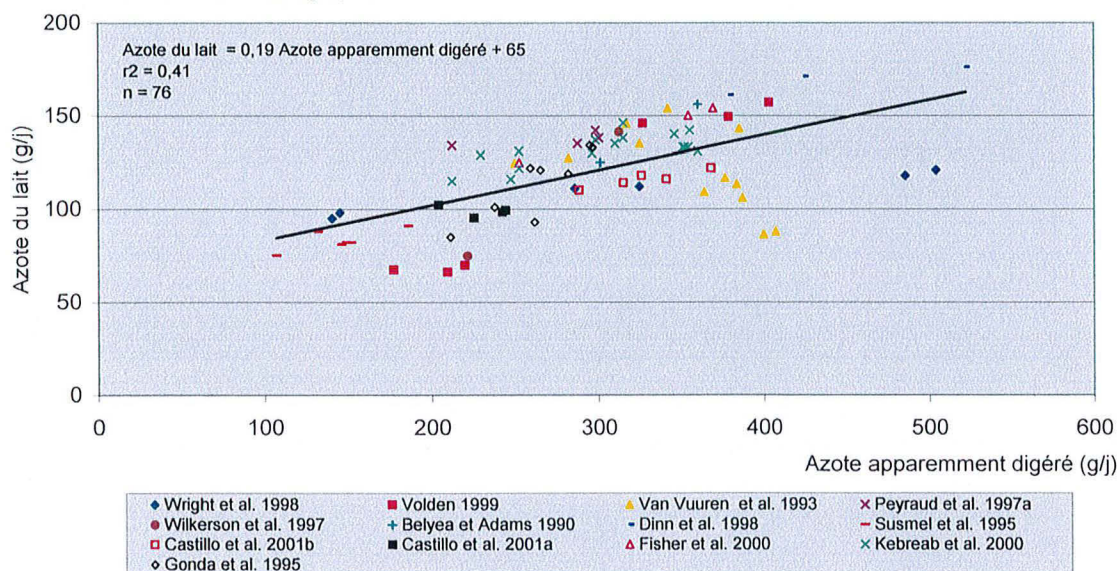


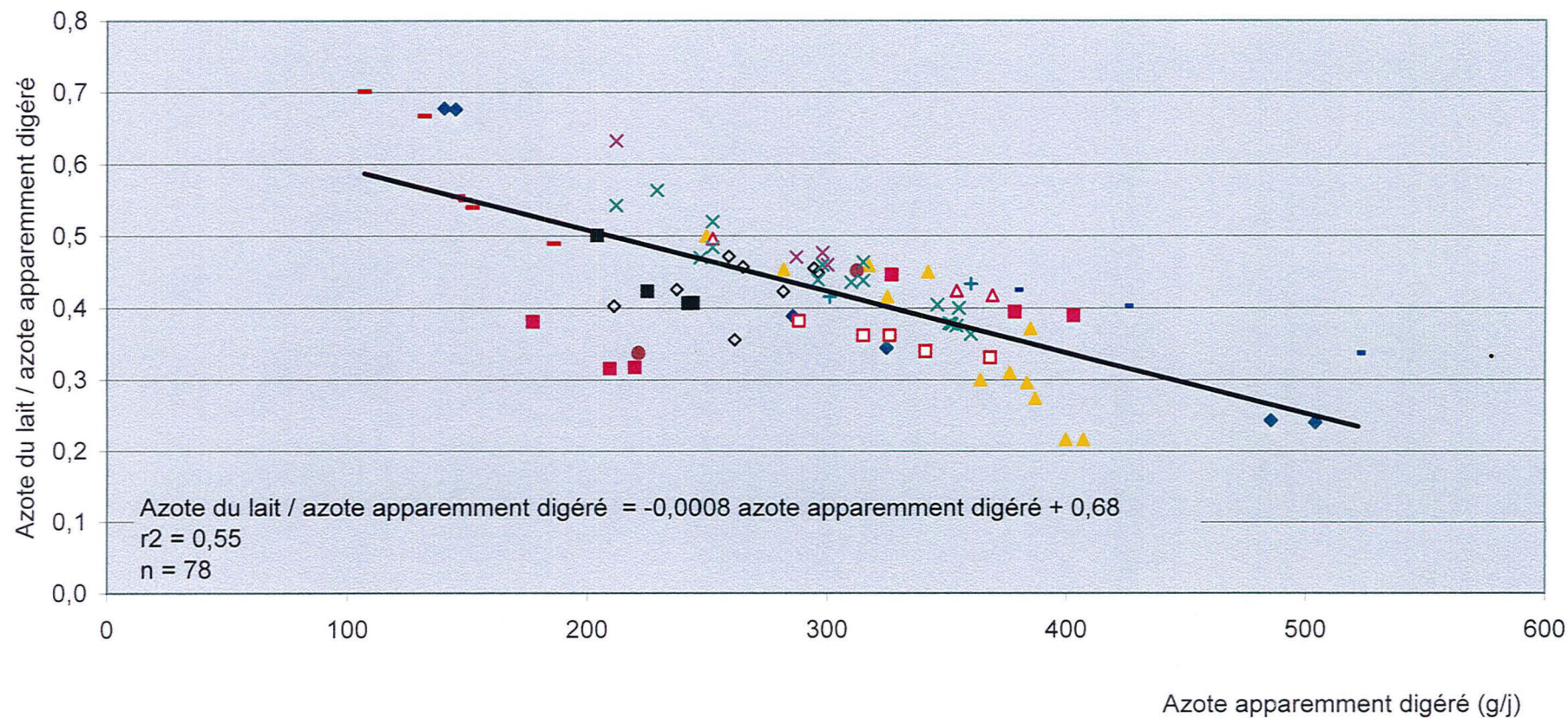
Figure 15: Azote secrété dans le lait en fonction de l'azote apparemment digéré d'après les données de la bibliographie



(Wright *et al.*, 1998) que celles obtenues avec une ration témoin (33%) (Dinn *et al.*, 1998) (Figure 16). Cet écart important pourrait être expliqué en partie par un déficit important d'énergie pour les traitements de Wright *et al.* (1998). Les valeurs faibles observées par Van Vuuren *et al.* (1993) sont également associées à des régimes dont les teneurs en énergie sont faibles (herbe seulement). Pour les quantités inférieures à 200 g N digéré/j, les quantités d'azote fixé dans le lait sont comprises entre 60 et 100 g/j (Figure 15). Les variations faibles de dégradabilité des protéines alimentaires (de 4.8 à 6.9%) n'ont pas d'influence, dans cette gamme de valeur d'azote digéré, sur la sécrétion d'azote dans le lait (Volden, 1999). La proportion de l'azote digéré fixée dans le lait diminue avec les quantités croissantes d'azote digéré (Figure 16) selon une relation linéaire ($r^2=0.55$).

Dans le but d'améliorer le rendement d'utilisation des AA de l'alimentation, certains peuvent être protégés contre la dégradation ruminale pour être digérés et absorbés dans l'intestin. Au sein d'une même expérimentation (Dinn *et al.*, 1998), la quantité d'azote fixé dans le lait n'est pas augmentée par l'introduction de Lysine et Méthionine protégées contre les dégradations ruminales. Toutefois, le traitement témoin conduit à un niveau en MAT plus élevé et par conséquent à une ingestion supérieure d'azote. L'expression des résultats sous la forme du rapport entre l'azote recueilli dans le lait et l'azote ingéré permet de mettre en évidence que l'azote ingéré est davantage valorisé lors d'un apport en AA protégés : 26% pour la ration de base (ensilages d'herbe et de maïs, orge, tourteaux de colza et soja) et 29% pour la même ration supplémentée avec les AA protégés. Les niveaux de couverture des besoins azotés auraient peut-être pu apporter des éléments d'explication mais ils ne sont pas disponibles. Ces résultats confirment le fait que la supplémentation d'un mélange d'ensilage de maïs et de tourteau de soja par de la Lysine et de la Méthionine protégées, observée par Colin-Schoellen *et al.* (1995) conduit à une augmentation de la synthèse protéique. Le caractère limitant ou non d'un AA est à rapporter à la composition en AA de la ration distribuée à l'animal (Schwab, 1996). Ainsi, à partir des données de la littérature, l'Histidine est montrée plus limitante que la Méthionine et la Lysine avec des rations à base d'ensilage d'herbe (Rulquin *et al.*, 2001b). Toutefois, cette démarche néglige le fait que les AA microbiens ne sont pas en lien direct avec la composition de la ration. Une nouvelle approche s'intéressant aux AA digestibles dans l'intestin (AADI) a montré que la production de protéines augmente linéairement avec la teneur de la ration en Histidine digestible dans l'intestin ; le taux protéique atteint un plateau au-delà d'une teneur de 3.2% des PDIE (Rulquin *et al.*, 2001a). La Leucine pourrait devenir limitante dans la mesure où la teneur en Leucine digestible dans l'intestin de la ration est inférieure à 8.8%. La Lysine et la

Figure 16: Part de l'azote apparemment digéré sécrétée dans le lait en fonction de l'azote apparemment digéré d'après les données de la bibliographie



- | | | | | |
|------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| ◆ Wright et al. 1998 | ■ Volden 1999 | ▲ Van Vuuren et al. 1993 | ✕ Peyraud et al. 1997a | ● Wilkerson et al. 1997 |
| + Belyea et Adams 1990 | ■ Dinn et al. 1998 | - Susmel et al. 1995 | □ Castillo et al. 2001b | ■ Castillo et al. 2001a |
| △ Fisher et al. 2000 | ◇ Gonda et al. 1995 | ✕ Kebreab et al. 2000 | | |

Méthionine présentent des seuils d'alerte situés respectivement à 6.8 et 2.1%. La Valine et l'Isoleucine ne semblent pas être des AA limitants pour la synthèse des protéines du lait pour des concentrations en AA digestibles dans l'intestin supérieures à 5.3% et 5.0% respectivement (Rulquin *et al.*, 2001a). L'ensemble des données disponibles sur les réponses du taux protéique aux variations des apports en AADI ont conduit à la mise en place de recommandations présentées dans le Tableau 7. La Lysine et la Méthionine sont reconnues comme AA limitants par de nombreux travaux basés sur une approche au niveau de la ration (Colin-Schoellen *et al.*, 1995 ; Bertrand *et al.*, 1998 ; Xu *et al.*, 1998). Toutefois, il semblerait qu'en terme d'AADI, ces AA ne soient pas les seuls à limiter la synthèse des protéines du lait.

III.2.2. Nature des AA circulants

III.2.2.1. Taux d'extraction

Le taux d'extraction des AA du sang artériel (différence des concentrations artérioveineuse / concentration artérielle) est fonction de la nature de chacun des AA (Tableau 8). Cette expression est considérée comme la plus efficace pour l'étude de l'utilisation mammaire des AA pour la synthèse protéique (Piepenbrink *et al.*, 1998). Le taux d'extraction des AAE est en moyenne supérieur à celui des AANE (43.6 contre 23.8%). Globalement, les AA ayant le taux d'extraction du sang artériel le plus élevé sont : la Lysine, l'Histidine, la Méthionine, la Leucine, la Phénylalanine, le Glutamate, la Tyrosine et l'Ornithine. Le taux d'extraction de la Glycine est négatif pour l'ensemble des auteurs ; ceci laisse entendre une synthèse de cet AA par la glande mammaire. Les résultats de Metcalf *et al.* (1996) et Piepenbrink *et al.* (1998) s'écartent de ceux obtenus par les autres auteurs ; ceci pourrait être expliqué par une méthode différente de calcul (voir légende du Tableau 8).

D'après les données de la littérature, les variations du taux d'extraction en fonction des apports dépend également de la nature des AA (Tableau 9). Trois groupes d'AA sont définis : pour le premier groupe (Leucine et Lysine) une augmentation des apports au niveau artériel est associée à une augmentation de l'extraction effectuée par la mamelle; pour le deuxième groupe (Tyrosine et Phénylalanine), une relation opposée est observée entre les apports et le taux d'extraction ; pour le troisième groupe (Histidine et Proline), il n'y a pas de modification du taux d'extraction en fonction de la variation des apports (Metcalf *et al.*, 1994). Toutefois, la définition des groupes d'AA selon leur capacité à être extraits du sang artériel est également dépendante de la concentration artérielle en AA circulants. Ceci pourrait alors expliquer les observations parfois opposées relevées dans la littérature. D'une manière

Tableau 7: Recommandations des apports en AADI
pour les vaches laitières d'après Rulquin *et al.* (2001a)

AA	Recommandation (en % des PDIE)
Lysine	6,8
Méthionine	2,1
Histidine	2,5 - 3,2
Leucine	8,8
Valine	5,3
Isoleucine	5,0
Phénylalanine	4,0 - 5,0
Thréonine	4,0
Arginine	4,3

Tableau 8 : Taux d'extraction des AA du sang artériel par la glande mammaire dans une situation témoin de différents auteurs
(valeurs en % de la concentration artérielle)

		α Casper et Schingoethe 1989	α Guinard et Rulquin 1994b	α Guinard et Rulquin 1994a	χ Metcalfe <i>et al.</i> 1996	β Piepenbrink <i>et al.</i> 1998	α Mabjeesh <i>et al.</i> 1999		
Conditions expérimentales		Synthèse bibliographique: 7 références 97 observations Caractéristiques moyennes: 16,1% MAT 1,02 UFL/kg MS Production=36,9 kg/j TP= 29,1 g/kg	Vaches laitières Holstein 76% E. Maïs + luzerne déshydratée + concentré 14,0% MAT Production= 24,1 kg/j TP= 27,2 g/kg	Vaches laitières Holstein 70% E. Maïs + luzerne déshydratée + concentré 15,9% MAT Production= 21,7 kg/j TP= 31,0 g/kg MSI=17,0 kg/j	Vaches laitières Holstein E. Herbe + orge+ blé + maïs grain + pulpes betteraves 14,1% MAT Production= 20,7 kg/j TP= 32,6 g/kg MSI=16,5 kg/j	Vaches laitières Holstein Foin de luzerne + E. Maïs + Maïs grain + T. soja 15,7% MAT 1,03 UFL/kg MS Production= 32,7 kg/j TP= 31,0 g/kg MSI=25,5 kg/j	Vaches laitières Holstein E. Maïs + son de blé + Maïs grain + Graines de coton 13,5% MAT 1,03 UFL/kg MS Production= 22,5 kg/j TP= 32,0 g/kg MSI=15,6 kg/j	Moyenne	Ecart-Type
AA	Nature								
Lys	Essentiel	55,1	53,3	61,1	105,0	27,8 - 37,8	78,9	64,2	25,0
His	Essentiel	25,3	23,6	49,1	77,0	18,9 - 25,8	47,5	40,8	21,4
Arg	Essentiel	25,1	38,1	44,2	ND	5,1 - 6,2	47,8	32,2	17,2
Thr	Essentiel	33,7	25,6	32,1	ND	15,9 - 20,2	31,2	28,1	6,4
Val	Essentiel	25,8	22,7	30,0	103,0	8,1 - 9,6	31,6	37,0	33,3
Met	Essentiel	56,0	45,6	27,1	80,0	31,2 - 42,8	73,5	53,0	20,8
Ile	Essentiel	44,5	34,9	44,0	101,0	14,2 - 19,7	42,3	47,3	28,3
Leu	Essentiel	46,6	39,7	57,5	88,0	15,4 - 19,6	42,7	48,6	23,4
Phe	Essentiel	52,0	36,0	46,2	75,0	21,6 - 29,2	57,8	48,8	17,3
Cys	Essentiel	ND	1,1	7,1	ND	ND	ND	4,1	4,2
Asn	Non essentiel	ND	4,5	3,3	ND	ND	ND	3,9	0,8
Ser	Non essentiel	ND	14,7	19,5	32,0	ND	ND	22,1	8,9
Glu	Non essentiel	ND	71,8	78,1	84,0	ND	ND	78,0	6,1
Gln	Non essentiel	ND	10,5	13,2	68,0	ND	ND	30,6	32,4
Pro	Non essentiel	ND	11,1	12,4	14,0	ND	ND	12,5	1,5
Gly	Non essentiel	ND	-4,8	-1,4	-65,0	ND	ND	-23,7	35,8
Ala	Non essentiel	ND	9,6	8,0	47,0	ND	ND	21,5	22,1
Tyr	Semi-essentiel	53,2	24,2	50,9	65,0	16,9 - 27,1	ND	43,1	19,0
Trp	Non essentiel	14,6	ND	ND	ND	7,4 - 8,6	ND	11,3	4,7
Tau	Non essentiel	ND	ND	4,9	ND	ND	ND	4,9	0,0
Orn	Non essentiel	ND	43,7	48,3	ND	ND	ND	46,0	3,3
Cit	Non essentiel	ND	0,1	-6,9	ND	ND	ND	-3,4	4,9

α : Taux d'extraction = $100 \times (\text{différence des concentrations artério-veineuse} / \text{concentration artérielle})$

β : Taux d'extraction = $(\text{quantité AA sécrétés dans le lait} \times 100) / (\text{concentration artérielle} \times \text{flux sanguin mammaire})$

χ : Taux d'extraction = $(\text{sécrétion dans les protéines du lait} - 5\% \text{ pour l'ANP}) / \text{concentration artérielle}$

ND : Non Déterminé

Tableau 9 : Evolution du taux d'extraction des AA du sang artériel par la glande mammaire en fonction du niveau d'apport

Nature AA	Apport AA	Taux d'extraction	Conditions expérimentales	Référence
Leu Lys			Farine de poisson	χ Metcalf <i>et al.</i> 1994
Tyr Phe				
His Pro	 ou 	=		
Arg Thr Ile Phe			Infusion duodénale de caséines	α Guinard et Rulquin 1994b
Asp Ser Gln Pro Tyr Cit		 quasi-linéaire		
Autres AA		 non linéaire		
Lys			Infusion duodénale de Lysine	α Guinard et Rulquin 1994a
Lys Met Phe		 linéaire	Substitution de graines de coton par des graines de coton traitées contre les dégradations ruminales	α Mabjeesh <i>et al.</i> 1999
Autres AA		=		
Met Phe Tyr His Ile Leu			Supplémentation en Tourteau de soja protégé contre les dégradations ruminales	χ Metcalf <i>et al.</i> 1996
Val Lys Gly Ser Gln				
Ala Glu				

α : Taux d'extraction = $100 \times (\text{différence des concentrations artério-veineuse} / \text{concentration artérielle})$

β : Taux d'extraction = $(\text{quantité AA sécrétés dans le lait} \times 100) / (\text{concentration artérielle} \times \text{flux sanguin mammaire})$

χ : Taux d'extraction = $(\text{sécrétion dans les protéines du lait} - 5\% \text{ pour l'ANP}) / \text{concentration artérielle}$

générale pour l'ensemble des AA, les transporteurs n'ont pas atteint leur seuil de saturation lorsque les concentrations en AA sont augmentées par des infusions duodénales de caséines jusqu'à une valeur plasmatique de 27.9 mg/100mL pour les AA totaux (Guinard et Rulquin, 1994b).

III.2.2.2. Sécrétion dans le lait

Le métabolisme de la mamelle peut conduire à une sécrétion des protéines dans le lait qui n'est pas directement en lien avec l'extraction des AA du sang artériel. Une typologie des AA sécrétés a été réalisée en fonction de leur absorption (Tableau 10). Dans la plupart des cas, l'absorption est supérieure à la sécrétion. Cependant Metcalf *et al.* (1994) observent un résultat opposé aux autres auteurs pour la Phénylalanine, la Tyrosine, la Sérine, l'Alanine et la Proline. Ces résultats peuvent être expliqués non pas par des concentrations artérielles particulièrement faibles dans cette expérimentation mais par un niveau plus élevé de production des protéines (production de 28 contre 23 et 24 kg de lait/j associée à des taux protéiques de 32 contre 25 et 27 g/kg respectivement). Il est envisagé dans ce cas précis que les apports artériels ne permettent pas de couvrir les besoins de synthèse et/ou de sécrétion, ce qui laisse supposer une synthèse et/ou une conversion de ces AA par la glande mammaire. Cette hypothèse vient conforter les travaux de Linzell et Mepham (1968) qui avaient montré chez la chèvre que la Sérine et l'Alanine peuvent être synthétisées à partir du glucose et de l'Aspartate dans le lactocyte. Lorsque la sécrétion est supérieure à l'absorption, une source complémentaire aux apports d'AA libres doit intervenir comme précurseurs des protéines du lait (Metcalf *et al.*, 1994 ; Bequette *et al.*, 1996). Metcalf *et al.* (1996) estiment globalement le déficit à 11% pour les AA absorbés par rapport aux AA sécrétés dans le lait. Au niveau du lait, 80 à 89% de la Méthionine sécrétée serait d'origine sanguine (Metcalf *et al.*, 1996) et la quasi-totalité de la Leucine (proche de 94%) contenue dans les caséines proviendrait de la Leucine circulante (Bequette *et al.*, 1996).

Le lait contient comme protéines des caséines et également des protéines du lactosérum. Ces dernières sont en partie synthétisées par les lactocytes (α lactalbumine et β lactoglobuline) et en partie prélevées dans le sang (immunoglobulines et sérumalbumine) (Aschaffenburg et Drewry, 1959). De ce fait, la quantité totale de protéines sécrétées dans le lait est supérieure à celle synthétisée par les lactocytes (Bequette *et al.*, 1996). Guinard et Rulquin (1994b) démontrent un bilan positif des mouvements d'AA au niveau de la mamelle. Les AANE et les AAE pour lesquels l'absorption est similaire à la sécrétion (Histidine,

Tableau 10: Evolution du rapport absorption des AA du sang artériel par la mamelle / sécrétion dans le lait, en fonction du niveau azoté de la ration

AA	Absorption	Sécrétion	Evolution Absorption/Sécrétion avec augmentation MAT	Conditions expérimentales	Production kg/j	TP g/kg	Référence
His Thr Met	=						
Phe	> sauf pour témoin			14% MAT	24	27	Guinard et Rulquin 1994b
Lys Arg Val Leu Ile	>			Infusion duodénale de caséines			
Phe Tyr Ser Ala Pro	<			12 - 17% MAT			
His Lys	>			Voie alimentaire: Addition de farine de poisson	28	32	Metcalf <i>et al.</i> 1994
Leu	>		=	10-15% MAT Addition de T. de soja protégé			Bequette <i>et al.</i> 1996
Phe	>						
Leu Lys Met Val	>			13.5 % MAT			
Thr	<			Voie alimentaire: Substitution de graines de coton par les même graines de traitées contre les dégradations ruminales	23	25	Mabjeesh <i>et al.</i> 1999
Arg His Ileu	>						

Thréonine, Méthionine et Phénylalanine), auraient des transferts directs dans les protéines du lait (Guinard et Rulquin, 1994b). La balance des AA absorbés serait alors rendue positive par l'absorption en excès de la Lysine, de l'Arginine et des AA ramifiés. Ces observations peuvent laisser croire à un stockage temporaire d'azote au niveau de la glande mammaire mais la voie d'un métabolisme important des tissus de la glande est à privilégier (Guinard et Rulquin, 1994b).

III.2.3. Apports énergétiques

Une relation logarithmique ($r^2=0.67$) permet de prédire la sécrétion d'azote dans le lait à partir du rapport entre les apports azotés et énergétiques de la ration (Figure 17). Cette figure montre que la production de l'azote dans le lait n'est pas saturée jusqu'à un apport de 30 g N/UFL. En revanche, la sécrétion dans le lait de l'azote ingéré (azote du lait / azote ingéré) diminue linéairement ($r^2 = 0.42$) lorsque le rapport entre l'azote et l'énergie de la ration augmente (Figure 18). Toutefois, cette tendance peut être controversée car Roseler *et al.* (1993), Dihman et Satter (1997) et Peyraud *et al.* (1997a) l'observent alors que les données de Belyea et Adams (1990), Susmel *et al.* (1995), Maiga et Schingoethe (1997), Rodriguez *et al.* (1997) et Piepenbrink *et al.* (1998) ne permettent pas de l'observer. Une constance approximative (car peu de données sont disponibles) de la valorisation jusqu'à des apports de 25 g N/UFL semble être observée. Au-delà, la valorisation de l'azote ingéré décroît avec l'augmentation de la quantité d'azote par UFL. Les données de Susmel *et al.* (1995) montrent un accroissement de la valorisation de l'azote ingéré dans un seul cas, pour une valeur constante du rapport entre l'azote ingéré et l'énergie ingérée. Ce résultat a été obtenu en début de lactation (entre J21 et J25) alors que la plupart des autres expérimentations ont lieu au-delà du pic de lactation. Le stade physiologique pourrait ainsi intervenir sur ce paramètre sans toutefois que ce résultat ait été confirmé par d'autres auteurs. Une sous-alimentation, traduite par un bilan énergétique négatif, appliquée à des vaches laitières entraîne une diminution de la quantité de lait produite et du taux protéique (Tamminga, 1992). La substitution d'amidon par des glucides structuraux conduit également à une diminution du taux protéique du lait (Tamminga, 1992).

III.3. Conclusion : éléments d'une loi de réponse

L'azote alimentaire est soumis à de nombreuses étapes avant d'être sécrété dans le lait (dégradation ruminale, digestion, absorption, recyclage, synthèse mammaire ...). Cependant, l'estimation de la quantité d'azote sécrété dans le lait est possible et de précision assez bonne

Figure 17: Azote secrété dans le lait en fonction du rapport entre l'azote et l'énergie de la ration d'après les données de la bibliographie

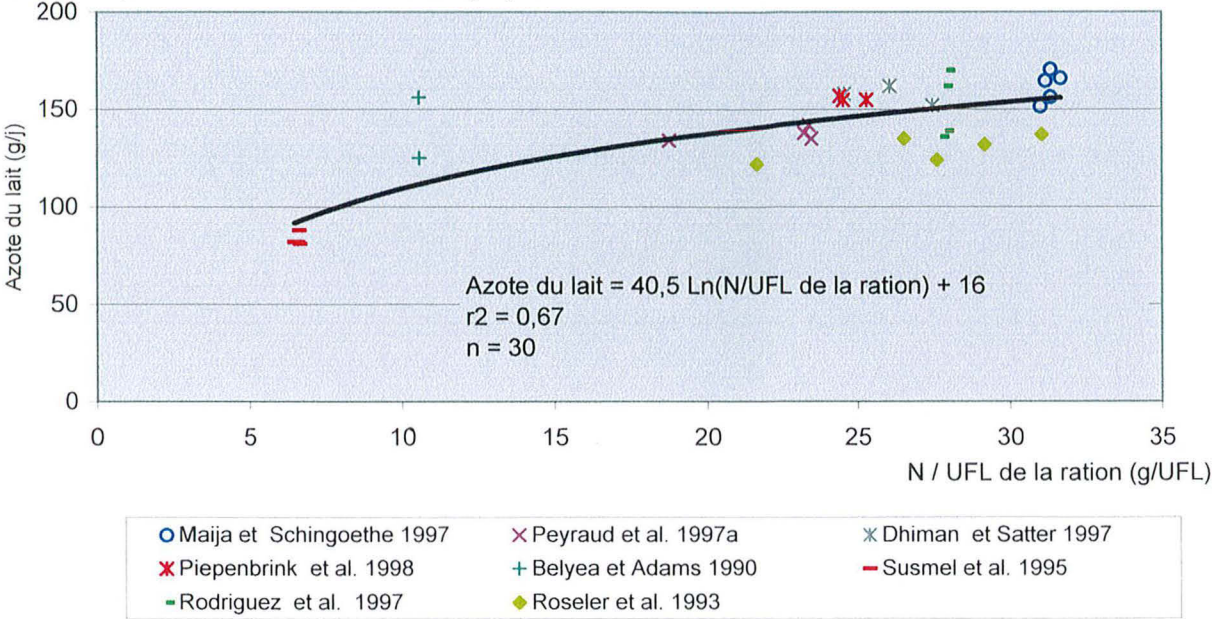
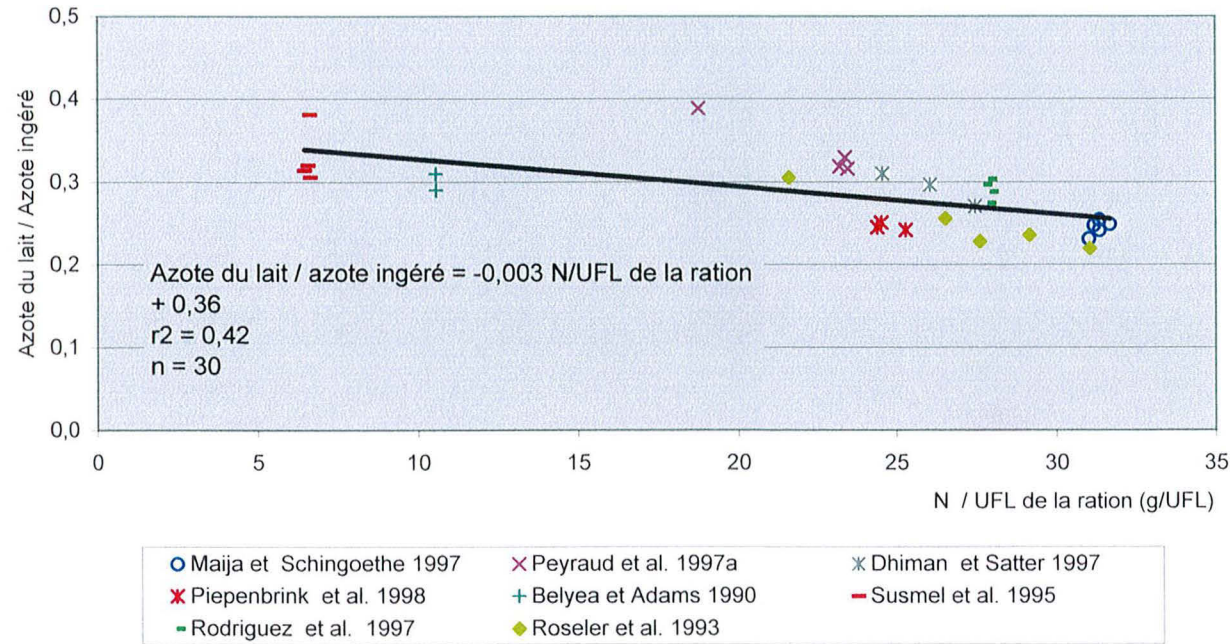


Figure 18: Part de l'azote ingéré secrétée dans le lait en fonction du rapport entre l'azote et l'énergie de la ration d'après les données de la bibliographie



à partir de variables simples telles que le rapport azote / énergie de la ration ($r^2 = 0.67$) et l'azote ingéré ($r^2 = 0.57$). La proportion de l'azote digéré sécrété dans le lait peut être prédite à partir de l'azote apparemment digéré ($r^2 = 0.55$). La précision de cette dernière estimation est plus élevée en fonction du niveau de couverture des besoins azotés ($r^2 = 0.72$) mais cette variable est purement mécanique et ne permet pas une modulation de la sécrétion.

La mise en commun des données abordées dans ce chapitre (régression linéaire multiple) permet de montrer que les variables qui expliquent les parts plus importantes de la variabilité de l'azote produit dans le lait sont la teneur en MAT de la ration pour l'intervalle 10-25% de la MS et la quantité d'azote ingéré lorsqu'elle est comprise entre 200 et 700 g/j. Deux équations sont établies pour la prédiction de la quantité d'azote sécrétée dans le lait. L'introduction des variables explicatives se fait au seuil de 5%, elles sont par conséquent suffisamment indépendantes pour apporter des informations significatives :

$$1) \text{ N lait (g/j) } = 86.3 - 6.1 \times \text{MAT de la ration (\%)} + 0.3 \times \text{N ingéré (g/j)}$$

$$(r^2 = 0.70 ; \text{ETR} = 14.3 ; n = 94)$$

Cette prédiction peut être améliorée lorsque le niveau de couverture des besoins azotés est disponible :

$$2) \text{ N lait (g/j) } = 81.1 - 1.7 \times \text{MAT de la ration (\%)} + 0.3 \times \text{N ingéré (g/j)} \\ - 0.6 \times \text{Taux de couverture azoté (\%)}$$

$$(r^2 = 0.91 ; \text{ETR} = 9.1 ; n = 55)$$

Ces prédictions permettent une très bonne précision de l'estimation de la quantité d'azote sécrétée dans le lait. Cependant, le rapport entre l'azote et l'énergie apportés par la ration n'est pas un paramètre qui ressort dans les équations alors que cette variable à elle seule explique 67% de la variabilité. Ceci peut être imputé au fait que les données disponibles sont peu nombreuses ($n=30$). Il pourrait être envisagé qu'une meilleure connaissance des valeurs énergétiques des rations utilisées permette une meilleure prédiction. Une fois encore, les données disponibles traitent de niveaux de couverture en azote largement excédentaires. Enfin, un éventuel effet du stade de lactation pourrait être envisagé sur la sécrétion d'azote dans le lait ou sur la part de l'azote ingéré et/ou digéré recueillie dans le lait.

IV. Modèles de prédiction de la distribution de l'azote

IV.1. Présentation des modèles

Depuis la fin des années 1990, des modèles de prédiction de la distribution de l'azote chez la vache laitière ont été publiés. La formulation des modèles est réalisée soit à partir d'un nombre restreint de publications récentes avec des données internes (Kauffman et St-Pierre, 2001 ; Kebreab *et al.*, 2002) ou non (Jonker *et al.*, 1998), soit à partir d'un nombre plus étendu de publications plus anciennes (Spanghero et Kowalski, 1997 ; Wilkerson *et al.*, 1997). Les caractéristiques moyennes des données employées sont présentées dans le Tableau 11. Ces cinq modèles conduisent à une étude de la distribution de l'azote pour de larges gammes de situations :

- de 13.1 à 22.4% MAT
- de 10.4 à 27.4 kg MSI/j
- de 10.5 à 50.1 kg de lait produit/j
- de 231 à 962 g N ingéré/j
- de 53 à 254 g N sécrété dans le lait/j
- de 49 à 411 g N urinaire/j
- de 83 à 276 g N fécal/j.

Les approches réalisées par les auteurs peuvent être très différentes. Elles sont brièvement présentées ci-après :

- Modèle de Spanghero et Kowalski (1997) :

Les auteurs ont réalisé une synthèse des essais de 1982 à 1996 abordant le sujet des bilans azotés chez la vache laitière. Une première étape consiste à corriger certaines données pour standardiser l'expression des résultats. En exemple, l'utilisation ou non d'acide sulfurique lors du prélèvement de l'urine ainsi que la concentration et le volume utilisé peuvent être cités. Des coefficients correcteurs sont alors appliqués sur les résultats. Les auteurs ont ensuite établi des relations linéaires simples entre les paramètres de façon à établir des prédictions des sorties azotées au niveau du lait et de l'urine (Tableau 12).

Ce modèle présente l'avantage d'être simple puisque ne sont nécessaires que les valeurs de la MSI et de l'azote ingéré pour la prédiction de l'azote sécrété dans le lait et de l'azote excrété via l'urine. Toutefois, ces équations sont fonctions de l'azote digestible qui est lui-même estimé à partir de l'azote ingéré. Ainsi, une possible accumulation des erreurs peut

Tableau 11 : Caractéristiques des données utilisées pour la formulation des modèles prédictifs de la distribution de l’azote chez la vache laitière

	Spanghero et Kowalski 1997	Wilkerson <i>et al.</i> 1997	Jonker <i>et al.</i> 1998	Kauffman et St-Pierre 2001	Kebreab <i>et al.</i> 2002
Nombre de publications	14	55	3	1	3
Nombre de rations	63		40	4	16
Nombre d'observations		1801	70		
Nombre de vaches		334	10	8	30
MAT (% MS)		16.1 ± 2.4	17.5 ± 1.4 (13.1 – 22.4)	15.1 ± 1.8 (13.2 – 16.9)	16.4 ± 1.7 (13.3 – 18.5) ^b
MSI (kg/j)	17.6 ± 3.2 (10.4 – 26.3)	16.2 ± 3.8	22.4 ± 2.8 (16.1 – 27.4)	20.7 ± 0.5 (20.1 – 21.2)	16.9 ± 0.9 (15.3 – 18.1)
Production (kg/j)	26.1 ± 7.3 (10.5 – 42.2)	22.8 ± 9.4	35.8 ± 7.6 (22.3 – 50.1)	27.9 ± 1.0 (26.5 – 28.6)	24.9 ± 2.6 (19.4 – 28.3) ^b
N ingéré (g/j)	467 ± 114 (231 – 784)		628 ± 129 (400 – 962)	505 ± 71 (429 – 560)	437 ± 73 (288 – 629)
N lait (g/j)	121 ± 36 (53 – 204)		176 ± 36 (106 – 254)	152 ± 7 (143 – 159)	122 ± 23 (76 – 182)
N urine	155 ± 56 (49 – 297)		231 ± 74 (130 – 411)	142 ± 52 (93 – 190)	153 ± 56 (65 – 353)
N fèces	152 ± 38 (83 – 285)		202 ± 29 (144 – 276)	189 ± 10 (178 – 198)	147 ± 21 (92 – 197)
Efficacité d'utilisation (%) ^a			28.3 ± 3.7 (21.1 – 38.0)	30.5 ± 3.4 (27.7 – 35.2)	

^a rapport entre l’azote du lait et l’azote ingéré

^b valeurs calculées à partir des moyennes disponibles dans les articles

Tableau 12 : Prédiction de la distribution de l’azote selon le modèle de Spanghero et Kowalski (1997)

Variable à expliquer		Coefficient de détermination
N digestible (g/kg MS)	= -7.20 + 0.936 N ingéré (g/kg MS)	$r^2 = 0.82$
N urinaire (g/j)	= 0.043 + 0.502 N digestible (g/j)	$r^2 = 0.70$
N lait (g/j)	= 0.016 + 0.204 N digestible (g/j)	$r^2 = 0.49$
N retenu (g/j)	= 0.042 + 0.293 N digestible (g/j)	$r^2 = 0.44$

être envisagé dans ce modèle. La précision de la prédiction reste modeste surtout pour la quantité d'azote sécrété dans le lait ($r^2 = 0.49$).

- Modèle de Wilkerson *et al.* (1997) :

Ces auteurs ont établi des relations linéaires multiples de façon à prédire l'excrétion fécale d'azote et l'excrétion totale (fécale + urinaire) d'azote (Tableau 13) à partir des travaux des 30 dernières années.

Le modèle de Wilkerson *et al.* (1997) permet d'estimer l'azote fécal de manière directe mais l'azote urinaire est déterminé par différence de l'excrétion totale et l'excrétion fécale. Aucune information n'est donnée en ce qui concerne la sécrétion d'azote dans le lait. Les équations de prédiction relativement compliquées comprennent cinq paramètres d'explication. La probabilité à l'introduction des variables explicatives est de 15%. Elles sont suffisamment indépendantes pour que la prise en considération de l'une apporte une explication supplémentaire de la variabilité. Pour l'estimation de l'excrétion fécale, la production est le paramètre dont le poids est le plus important dans l'équation (coefficient = 0.00395) alors que le poids vif de l'animal n'intervient que peu (coefficient = 0.0000925). En ce qui concerne l'excrétion totale d'azote, la variable qui a le poids le plus important est la teneur en MAT de la ration (coefficient = 0.0183) et celle qui en a le moins le poids vif (coefficient = 0.000232).

- Modèle de Jonker *et al.* (1998)

Préalablement à la construction de ce modèle, les auteurs posent le postulat de fortes corrélations entre l'azote urinaire et l'urémie d'une part, et entre l'urémie et le taux d'urée du lait (TUL) d'autre part. Ainsi, l'estimation de la quantité excrétée d'azote urinaire sera établie à partir du TUL (Tableau 14). Cette variable est ensuite utilisée dans l'expression des autres paramètres du modèle (N ingéré, N fécal et efficacité d'utilisation de N). L'estimation de l'azote ingéré fait intervenir deux constantes : la première correspondant en partie aux besoins d'entretien est obtenue en additionnant l'azote métabolique (97 g N/j), l'azote sécrété dans le lait et l'azote excrété dans l'urine; la seconde représente la digestibilité réelle de l'azote (0.83) qui est considérée constante pour toutes les rations.

Tableau 13: Coefficients de la régression linéaire multiple des équations de prédiction de l'excrétion azotée selon le modèle de Wilkerson *et al.* (1997)

	N fécal	N total excrété (fèces + urine)
Terme constant	- 0.0916	- 0.44
Poids vif (kg)	0.0000925	0.000232
Stade de lactation (j)	0.000124	0.000342
Production (kg/j) ^a	0.00395	0.00649
MAT ration (% MS)	0.00140	0.0183
NDF ration (% MS)	0.00138	0.0028
 r ²	 0.55	 0.65
ETR	0.031	0.054

^a Lait contenant 3.6% de matière grasse et 3.2% de protéine

ETR : écart-type résiduel

Tableau 14 : Prédiction de la distribution de l’azote selon le modèle de Jonker *et al.* (1998)

Variable à expliquer		ETR	CV
N urinaire (g/j)	= 12.54 TUL (mg/dL)	39.2	16.9
N ingéré (g/j)	= (N urinaire + N lait + 97) / 0.83 (g/j) (g/j)	68.2	11.2
N fécal (g/j)	= N ingéré – N urinaire – N lait (g/j) (g/j) (g/j)	24.0	12.0
Efficacité d'utilisation de N (%)	= (N lait x 100) / N ingéré (g/j) (g/j)	3.1	11.0

ETR: écart-type résiduel

A partir du TUL et de l'azote du lait, les excréments azotés et l'efficacité d'utilisation peuvent être estimées. La relation linéaire entre l'azote urinaire et le TUL est bonne ; la pente est de 12.54 ± 0.24 soit moins de 2% de variation. Toutefois, la prédiction de l'azote urinaire admet un coefficient de variation important (16.9%). La constante calculée comme coefficient de digestibilité réelle de l'azote semble précise 0.83 ± 0.02 (2.4% de variation) et la détermination de l'azote métabolique apparaît plus variable (12.1%) avec des valeurs de 97.0 ± 11.7 . La définition de ces deux constantes reste discutable surtout pour des conditions extrêmes. L'ensemble de ces données conduit à un modèle simple d'utilisation et d'une précision dans la prédiction relativement bonne. Ce modèle ne permet pas la prédiction de la distribution de l'azote dans tous les compartiments de sortie puisque la connaissance de l'azote sécrété dans le lait est nécessaire. Cependant, la quantité d'azote recueilli dans le lait reste une mesure facile à réaliser.

- Modèle de Kauffman et St-Pierre (2001)

Ces auteurs ont basé leur raisonnement sur la relation entre l'azote urinaire et le TUL de la même manière que Jonker *et al.* (1998). Ils supposent un effet de la race et par conséquent du poids de l'animal.

Une relation linéaire est établie pour prédire l'excrétion urinaire d'azote pour des vaches Holstein d'une part ($n = 4$, équation 1) et Jersey d'autre part ($n = 4$, équation 2) à partir de quatre régimes différents :

$$1) \text{ N urinaire (g/j) } = 17.6 (\pm 0.56) \text{ TUL (mg/dL)}$$

$$2) \text{ N urinaire (g/j) } = 11.8 (\pm 0.62) \text{ TUL (mg/dL)}$$

L'introduction du poids vif dans l'équation a pour effet de contrôler l'effet race et conduit à :

$$3) \text{ N urinaire (g/j) } = 0.0259 (\pm 0.0006) \text{ PV (kg) } \times \text{ TUL (mg/dL)}$$

$$(r^2 = 0.98 ; \text{ETR} = 74.1, n = 8)$$

Ce modèle semble bien approprié à la prédiction de l'excrétion d'azote dans l'urine. Selon Kohn *et al.* (2002) qui ont effectué une étude comparative de ces deux derniers

modèles à partir de leurs données, l'équation de prédiction 3 établie par Kauffman et St-Pierre (2001) est plus précise que celle proposée par Jonker *et al.* (1998) :

$$\text{ETR du modèle de Jonker } et al. (1998) = \text{ETR du modèle de Kauffman et St-Pierre (2001)} \\ + 15 \text{ pour une valeur d'excrétion urinaire d'azote moyenne de } 156 \text{ g/j.}$$

- Modèle de Kebreab *et al.* (2002)

Les auteurs ont développé un modèle dynamique à partir 5 de leurs expérimentations (3 publications). Le modèle est construit autour de quatre compartiments (alimentaire, acides aminés circulants, lait, urine) ainsi que des entrées et des sorties de chacun d'eux (Schéma 1). Les équations du modèle sont présentées dans le Tableau 15. Les paramètres des équations sont estimés par les auteurs à l'aide des données disponibles dans la littérature. Pour chaque niveau d'azote ingéré, des itérations successives sont mises en œuvre jusqu'à obtenir un état d'équilibre. Les valeurs ajustées du modèle sont présentées dans le Tableau 16.

Ce modèle est complet, il permet de déterminer la sécrétion d'azote dans le lait et les excrétions urinaire et fécale. La précision obtenue est globalement assez bonne puisque les coefficients de détermination entre les valeurs observées et prédites sont de 0.52 pour l'excrétion fécale d'azote, 0.79 pour l'excrétion urinaire d'azote, 0.61 pour la sécrétion d'azote dans le lait et 0.87 pour la totalité de l'excrétion azotée (urine + fèces). Cependant, le modèle demande la connaissance de nombreux paramètres pour être employé. Ainsi pour chaque pool, les valeurs des flux externes, des quantités circulantes et de l'utilisation sont nécessaires. Son approche très mathématique et très fine dans les informations nécessaires à son utilisation ne permettent pas de l'appliquer avec un objectif de détermination de la distribution de l'azote à partir de données simples à mesurer. Toutefois, la simulation de l'utilisation de l'azote par le modèle conduit à des informations d'ordre général :

- La relation entre l'excrétion fécale d'azote et l'azote ingéré est linéaire jusqu'à 420 g N ingéré/j. Au-delà, la relation est toujours linéaire mais avec une pente plus faible.
- L'excrétion d'azote via l'urine est une réponse exponentielle aux augmentations d'ingestion d'azote.

Schéma 1 : Représentation schématique du modèle du métabolisme de l’azote chez la vache laitière (Kebreab *et al.*, 2002).
Les cadres indiquent les pools d’azote et les flèches indiquent les flux.

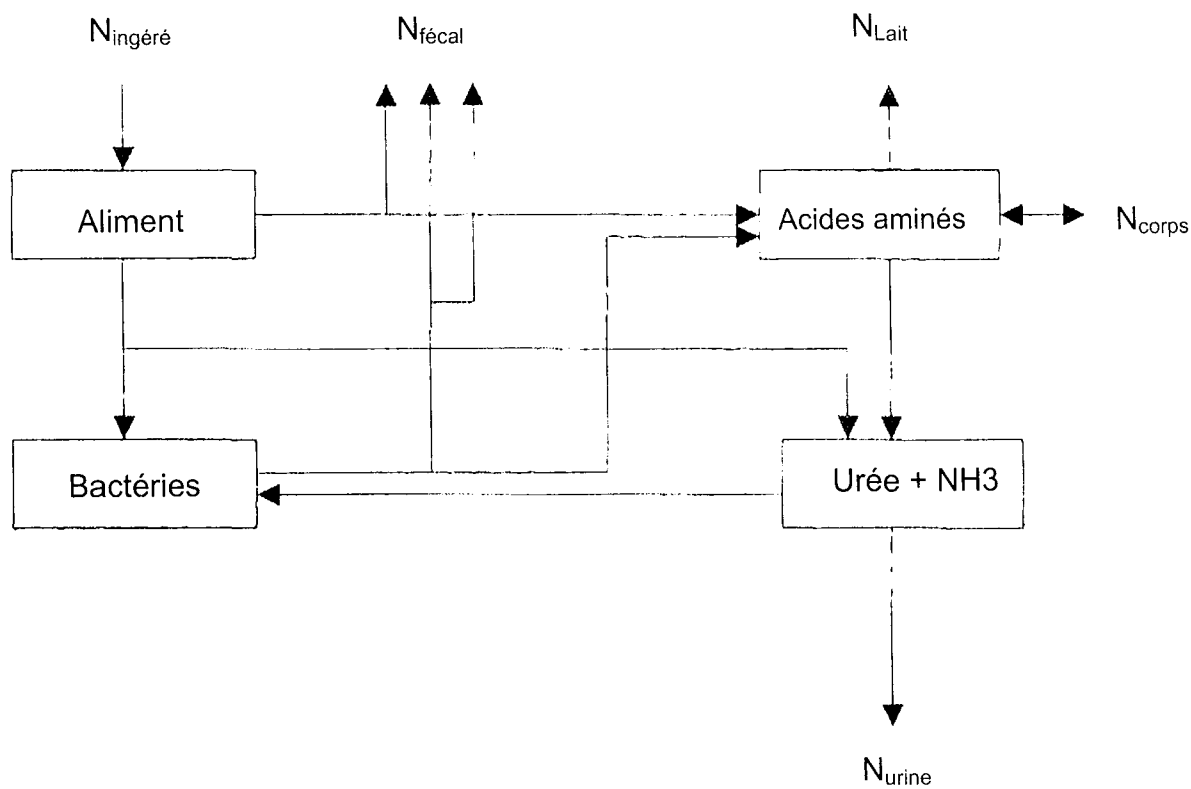


Tableau 15 : Equation de prédiction des flux d'azote selon le modèle de Kebreab *et al.* (2002)

	Entrées	Sorties	Equations différentielles
Pool N alimentaire (g N)	$P_{Al} = N_{Al}$	$U_{AlAa} = k_{AlAa} Q_{Al}$ $U_{AlMi} = k_{AlMi} Q_{Al}$	$dQ_{Al}/dt = P_{Al} - U_{AlAa} - U_{AlMi}$
Pool N microbien (g N)	$P_{MiAl} = R_{MiAl} U_{AlMi}$ $P_{MiUr} = R_{MiUr} U_{UrMi}$	$U_{MiAa} = k_{MiAa} Q_{Mi}$	$dQ_{Mi}/dt = P_{MiAl} + P_{MiUr} - U_{MiAa}$
Pool N acides aminés (g N)	$P_{AaAl} = R_{AaAl} U_{AlAa}$ $P_{AaMi} = R_{AaMi} U_{MiAa}$	$U_{AaCp} = k_{AaCp} Q_{Aa} - N_{Cd}$ $U_{AaLa} = k_{AaLa} Q_{Aa}$ $U_{AaUr} = k_{AaUr} Q_{Aa}$	$dQ_{Aa}/dt = P_{AaAl} + P_{AaMi} - U_{AaCp} - U_{AaLa} - U_{AaUr}$
Pool N urée et ammoniac (g N)	$P_{UrAa} = R_{UrAa} U_{AaUr}$ $P_{UrAl} = (1 - R_{MiAl}) U_{AlMi}$	$U_{UrMi} = (k_{UrMi} E) (1 + k_{UrMi} / Q_{Ur})$ $U_{UrUn} = k_{UrUn} Q_{Ur}$	$dQ_{Ur}/dt = P_{UrAa} + P_{UrAl} - U_{UrMi} - U_{UrUn}$
	Dépôt corporel	$N_{Cp} = U_{AaCp}$	
Equations auxiliaires (g N/j)	Excrétion N fécale Sécrétion N lait Excrétion N urine	$N_{Fe} = (1 - R_{AaAl}) U_{AlAa} + (1 - R_{AaMi}) U_{MiAa} + [N_{En} (1 - R_{AaMi}) U_{MiAa}]$ $N_{La} = U_{AaLa}$ $N_{Un} = U_{UrUn}$	

Symboles : E : énergie fermentescible en MJ/kg MS ; K_{ij} : constante d'affinité MJ énergie fermentescible/kg MS ; k_{ij} : constante de taux fractionné de la transaction de i-j exprimé /j ; N_i : flux externe entrant ou sortant du système en g N/j ; P_{ij} : production e i à j en g N/j ; Q_i : quantité de i en g N ; U_{ij} : utilisation de i à j (g N/j) ; R_{ij} : Rendement de i à j en g N de i

Indices : Aa : acides aminés ; Cp : corps ; Cd : dégradation des protéines corporelles ; Al : aliment ; En : endogène ; Fe : Fèces ; Mi : Microbes ; La : lait ; Un : urine ; Ur : urée et ammoniac

Tableau 16 : Valeurs des paramètres du modèle de Kebreab *et al.* (2002)

Paramètres		ETR
k_{AlAa}	0.33	0.012
k_{AlMi}	0.65	0.011
R_{MiAl}	0.05-0.30	0.05
R_{MiUr}	0.99	0.011
k_{MiAa}	0.99	0.015
R_{AaAl}	0.79	0.083
R_{AaMi}	0.63	0.013
k_{AaCp}	0.09	0.009
N_{Cd}	0.05	0.032
k_{AaLa}	0.63	0.067
k_{AaUr}	0.42	0.015
R_{UrAa}	1.02	0.01
k_{UrMi}	31.10	0.24
K_{UrMi}	150.0	6.1
k_{UrUn}	0.29	0.011
N_{En}	0.05	0.02

Symboles : K_{ij} : constante d'affinité MJ énergie fermentescible/kg MS ; k_{ij} : constante de taux fractionné de la transaction de i-j exprimé /j ; N_i : flux externe entrant ou sortant du système en g N/j ; R_{ij} : Rendement de i à j en g N de i

Indices : Aa : acides aminés ; Cp : corps ; Cd : dégradation des protéines corporelles ; Al : aliment ; En : endogène ; Fe : Fèces ; Mi : Microbes ; La : lait ; Un : urine ; Ur : urée et ammoniac

- Une relation linéaire est montrée entre la sécrétion d'azote dans le lait et l'ingestion d'azote jusqu'à 420 g N ingéré/j. Pour des ingestions plus importantes, la pente du segment de droite est plus faible.
- L'excrétion totale (urine + fèces) d'azote augmente linéairement avec l'azote ingéré.

Suite à la validation du modèle, les auteurs ont étudié l'effet de l'énergie fermentescible et de la dégradabilité des protéines sur la distribution de l'azote en modifiant les coefficients impliqués dans les équations du modèle :

Une augmentation de la teneur en énergie fermentescible dans la ration conduit à une augmentation de l'excrétion fécale d'azote et une diminution de l'excrétion urinaire. L'effet est d'autant plus marqué que le niveau d'ingestion en azote est élevé. Ceci est expliqué par les auteurs par le fait que la croissance microbienne est accrue en présence d'énergie fermentescible supplémentaire. Une absorption moindre d'ammoniac au niveau ruminal est alors attendue. Ceci a pour conséquence de diminuer les quantités d'urée circulante et d'azote urinaire. De plus, davantage de micro-organismes sont entraînés lors du transit. Il est également envisagé que l'énergie apportée en supplément soit en partie disponible au niveau du colon, ce qui induirait une fermentation plus élevée à ce niveau et une excrétion accrue d'azote endogène dans les fèces. De plus, la notion d'azote non digestible est à prendre en considération et ce d'autant plus que le niveau d'ingestion en azote est élevé.

Une augmentation de la disponibilité des protéines dans le rumen (modification des paramètres k_{AIMi} et k_{AIAa}) ne conduit pas à une variation de la quantité d'azote urinaire calculée pour des ingestions de 300 à 380 g d'N/j. En revanche, au-delà de 380 g d'N/j, l'excrétion urinaire d'azote augmente avec la dégradabilité des protéines alimentaires. L'effet observé est d'autant plus marqué que la quantité d'azote ingéré est importante. Pour les ingestions faibles (inférieures à 400 g N/j), une augmentation de la dégradabilité des protéines engendre un accroissement modéré de l'excrétion fécale. En revanche pour les niveaux d'ingestion plus élevés (supérieurs à 400 g N/j), une augmentation de la disponibilité de l'azote dans le rumen conduit à une légère diminution de l'excrétion fécale. En effet, une augmentation de la part indigestible des protéines est attendue avec la diminution de la dégradabilité ruminale.

IV.2. Conclusion

Les modèles présentés dans ce chapitre apportent tous des éléments en matière de prédiction de la distribution de l'azote. Certains ont une approche simple et par conséquent facilement transposable (Spanghero et Kowalski, 1997 ; Wilkerson *et al.*, 1997 ; Jonker *et al.*, 1998 ; Kauffman et St-Pierre, 2001) alors que d'autres sont dynamiques et fastidieux à utiliser (Kebreab *et al.*, 2002). Seul le modèle de Kebreab *et al.* (2002) permet de prédire de manière indépendante la sécrétion d'azote dans le lait et les excréments azotés urinaire et fécale. Le modèle de Spanghero et Kowalski (1997) peut conduire de manière indirecte à l'ensemble de ces résultats.

Deux types d'approches sont possibles en modélisation : la première consiste en une prédiction des variables de sortie dans un but de mesure ou d'explication comme l'ont fait Wilkerson *et al.* (1997), Jonker *et al.* (1998), Kauffman et St-Pierre (2001) et Kebreab. (2002) ; la seconde consiste à établir des équations de prédiction avec pour objectif de moduler les variables d'entrée afin de contrôler les variables de sortie comme l'ingestion d'azote peut l'être pour le modèle de Spanghero et Kowalski (1997). De plus, ces modèles ont été construits à partir de rations avec une large gamme de niveaux azotés mais jamais avec une optimisation du recyclage d'azote (déficit d'azote fermentescible par rapport à l'énergie c'est à dire apports en PDIN inférieurs à ceux en PDIE) dans un but de réduire les pertes azotés.

Conclusion de la synthèse bibliographique

L'azote ingéré est distribué entre le lait, les fèces et l'urine. L'excrétion fécale d'azote peut être étudiée par l'intermédiaire de la digestibilité de l'azote. La digestibilité apparente augmente surtout avec le niveau de MAT de la ration et beaucoup moins avec le niveau d'ingestion. L'énergie fournie pourrait constituer une variable explicative. Cependant, les données disponibles ne permettent pas de le mettre en évidence. L'azote urinaire est fortement corrélé à la teneur en MAT de la ration, au taux de couverture azotée et à la quantité d'azote ingéré. Ainsi de la même façon que pour l'excrétion fécale, les paramètres de fourniture à l'organisme et la notion d'excédant ou non par rapport aux besoins permettent de prédire les variations de l'excrétion. La dégradabilité ruminale et les apports énergétiques sont susceptibles d'avoir des influences notables même si elles ne peuvent être mises en évidence de manière claire. La sécrétion d'azote dans le lait est fortement liée avec le rapport entre l'azote et l'énergie de la ration ainsi qu'avec le niveau d'ingestion d'azote. La prédiction de la quantité d'azote produite dans le lait est moins bonne avec la quantité d'azote digéré.

A partir de l'ensemble des résultats traités dans cette synthèse bibliographique, des équations simples de prédiction des quantités d'azote sécrété dans le lait ou excrété dans l'environnement sous forme urinaire ou fécale ont été établies. Seuls deux paramètres (teneur en MAT de la ration et quantité d'azote ingéré) permettent de prédire de l'ensemble des voies de distribution de l'azote de façon satisfaisante :

$$\mathbf{N\ fécal\ (g/j) = 82.7 - 3.12 \times MAT\ de\ la\ ration\ (\%) + 0.24 \times N\ ingéré\ (g/j)}$$

$$(r^2 = 0.60 ; \text{moyenne} = 139\ \text{g/j} ; \text{ETR} = 14.9 ; n = 77)$$

$$\mathbf{N\ urinaire\ (g/j) = -166 + 11.6 \times MAT\ de\ la\ ration\ (\%) + 0.3 \times N\ ingéré\ (g/j)}$$

$$(r^2 = 0.84 ; \text{moyenne} = 154\ \text{g/j} ; \text{ETR} = 37 ; n = 88)$$

$$\mathbf{N\ lait\ (g/j) = 86.3 - 6.1 \times MAT\ de\ la\ ration\ (\%) + 0.3 \times N\ ingéré\ (g/j)}$$

$$(r^2 = 0.70 ; \text{moyenne} = 126\ \text{g/j} ; \text{ETR} = 14.3 ; n = 94)$$

Ces régressions multiples ont été calculées à partir d'un jeu de données avec une grande amplitude des teneurs en MAT de la ration (entre 10 et 25% de la MS) et de l'ingestion d'azote (entre 200 et 700 g/j).

Actuellement quelques modèles de la distribution d'azote chez la vache laitière sont disponibles. Toutefois, ces modèles sont rarement complets et plusieurs lacunes ressortent de leur étude. En effet, aucune approche de la distribution de l'azote n'a été effectuée avec des conditions de réduction des rejets azotés c'est à dire avec la recherche d'une optimisation du recyclage d'urée par la création d'un déficit en azote fermentescible dans le rumen (apports PDIN inférieurs aux apports PDIE). De plus, ils ne permettent pas un contrôle des variables de sortie (azote dans le lait, les fèces et l'urine) car les variables explicatives ne sont pas toujours modulables.

Problématique

Il ressort de la synthèse bibliographique que la quantité des protéines apportées dans la ration de la vache laitière ainsi que leur nature contrôlent dans une large mesure l'utilisation de l'azote, en interaction avec les apports énergétiques. Mais la plupart des travaux ont été menés avec des apports protéiques élevés conduisant à des niveaux de couverture des besoins excédentaires et bien souvent sans contrôle des apports d'énergie associés. Notre travail se propose d'approfondir la connaissance du déterminisme de la répartition des flux d'azote au sein de la vache laitière en production, en prenant en compte trois compartiments de sortie : lait, urine et fèces. Les rations utilisées présentent un déficit en azote fermentescible dans le rumen par rapport à l'énergie fermentescible de façon systématique ($PDIN < PDIE$) afin de se positionner dans des conditions favorables au recyclage de l'urée circulante et par conséquent de minimiser l'excrétion d'azote par les voies urinaire et fécale. La nature et le niveau des sources d'azote ainsi que des sources énergétiques constituent des paramètres contrôlés. La caractérisation de l'azote dans les différents compartiments de sortie ainsi que les mesures dans les compartiments intermédiaires (rumen, sang) doivent permettre d'expliquer les variations relatives des différents flux.

Dans la première expérimentation nous avons cherché quel niveau de MAT de la ration (parmi les trois niveaux testés) conduit à un compromis intéressant entre l'azote protéique sécrété du lait, l'azote rejeté dans l'urine et les fèces et la production laitière. Pour cela les questions suivantes ont été posées : Quel est l'effet du niveau azoté sur la répartition de l'azote entre le lait, l'urine et les fèces ? Quelle est la conséquence d'une diminution des apports azotés sur les performances zootechniques des animaux ? Quelle est la portée d'un déficit des apports d'azote fermentescible (par rapport à l'énergie fermentescible) sur la répartition entre le lait, les fèces et l'urine, de l'azote ingéré relativement aux données de la littérature ?

Dans la deuxième expérimentation, l'effet du stade de lactation sur l'exportation de l'azote dans le lait et son éventuelle interaction avec le niveau de MAT de la ration est étudié. L'impact du niveau énergétique, pour un niveau d'azote donné, sur la distribution de l'azote entre le lait, l'urine et les fèces fait l'objet de la troisième expérimentation.

Par ailleurs pour la construction de ces essais, nous retenons les hypothèses suivantes : :

- La teneur des protéines dans la ration est un facteur qui engendre des modifications de l'utilisation de l'azote par l'organisme.

- Un déficit des apports en azote fermentescible en comparaison des apports en énergie fermentescible ($PDIN < PDIE$) conduit à un recyclage de l'urée circulante. Lorsque ce déficit n'est pas trop important, de l'ordre de 10 g/kg de MS, il peut être compensé par le recyclage et ne pourra ainsi pas être considéré comme responsable d'une éventuelle diminution des performances zootechniques (Colin-Schoellen et al., 2000).

- Les rations utilisées sont calculées pour satisfaire au bon développement des micro-organismes du rumen. Ce point fera l'objet d'une vérification par l'étude du profil fermentaire et des dégradations ruminales des fractions azotée et organique des rations.

Matériel et méthodes

Matériel et méthodes

I. Présentation générale des essais

La partie expérimentale est constituée de trois essais :

- L'expérimentation A « Distribution de l'azote entre le lait, les fèces et l'urine selon le niveau de MAT de la ration » permet l'étude de trois niveaux de MAT dans la ration sur la distribution de l'azote entre le lait, l'urine et les fèces.
- L'expérimentation B « Effet du stade de lactation sur la sécrétion d'azote dans le lait en interaction avec le niveau de MAT de la ration » permet l'étude du stade de lactation sur la distribution de l'azote (entre le lait et les fèces) et l'interaction entre le stade physiologique et le niveau de MAT de la ration.
- L'expérimentation C « Effet de l'énergie pour un niveau de MAT donné de la ration sur la distribution de l'azote entre le lait, les fèces et l'urine » permet d'observer l'impact du niveau énergétique pour des apports azotés fixes sur la distribution de l'azote entre le lait, l'urine et les fèces, et ce pour deux niveaux de MAT de la ration . L'interaction du niveau énergétique avec le niveau de MAT de la ration est également étudiée.

Les dispositifs de ces expérimentations sont données dans le Tableau 17.

I.1. Animaux

Les vaches laitières de race Prim' Holstein sont logées en stabulation libre à logettes individuelles couvertes d'un tapis en caoutchouc et paillées, au domaine expérimental de l'ENSAIA.

Certaines vaches multipares sont munies de canules ruminales (# 3 C, Bar Diamond Inc., Idaho, USA) pour l'étude des paramètres ruminiaux (dégradabilité in sacco et profil de fermentation). La pose des fistules a été réalisée au moins trois semaines après vêlage et au moins trois semaines avant la mise en essai.

Tableau 17 : Présentation du dispositif expérimental de chaque essai

	Expérimentation A	Expérimentation B	Expérimentation C
Nombre de vaches	9	20	16
Nombre de primipares	3	6	0
Nombre de multipares	6	14	16
dont fistulées	3	0	4
Dispositif	carré latin 3 x 3	blocs complets	Carré latin 4 x 4
Facteurs étudiés	3 niveaux de MAT	2 niveaux de MAT Stade de lactation	2 niveaux de MAT 2 niveaux d'énergie

I.2. Allotement

Les premiers facteurs d'allotement des vaches sont la parité et la date de vêlage. De plus, pour réaliser les allotements, des mesures pré-expérimentales de production et du taux protéique du lait sont effectuées sur les animaux. Les vaches qui présentent les caractéristiques les plus proches sont regroupées dans un bloc et ensuite réparties aléatoirement dans chacun des lots, à l'exception des vaches munies d'une canule ruminale. Le Tableau 18 présente le descriptif des performances et des caractéristiques de chaque bloc.

I.3. Alimentation

L'alimentation est proposée sous forme d'une ration complète, distribuée individuellement une fois par jour. L'accès est contrôlé à l'aide de portillons électroniques (SEFER, Neuville de Poitou, France) : chaque vache est équipée d'un transponder permettant l'ouverture d'un seul portillon. Les animaux sont alimentés *ad libitum* : pour cela les quantités distribuées sont ajustées au jour le jour en fonction de l'ingestion de la veille et de façon à ce que les refus soient au minimum de 10%.

A chaque changement de régime, la transition est effectuée durant une semaine, une ou deux semaines sont ensuite réservées à l'adaptation pour atteindre l'état d'homéostasie. Les mesures et la collecte des échantillons sont réalisées après cette période d'adaptation.

Un intérêt particulier a été porté aux composants des rations de façon à ce que, au sein d'une expérimentation, la nature des aliments employés soit la plus proche possible, et donc que seules les proportions des différents aliments distinguent les traitements. La composition des rations et leur valeur nutritive sont présentées Tableau 19. Un déficit systématique d'azote fermentescible ($PDIN < PDIE$ de l'ordre de 10 g/kg MS) est établi pour chaque traitement afin d'optimiser le recyclage d'urée. Ce déficit, compensé par le recyclage, conduit au sein d'une même expérimentation à une synthèse des protéines microbiennes (PDIM) similaires entre les traitements. Ce sont donc les protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire (PDIA) qui distinguent les régimes entre eux.

I.4. Mesures et prélèvements

La durée des périodes est de 3 semaines pour l'expérimentation A et de 4 semaines pour l'expérimentation C. Chaque période se termine par une semaine de mesures. Pour

Tableau 18 : Caractéristiques des animaux au début de l’essai (moyenne et écart-type par lot)

	Parité	Stade (en jour)	MS ingérée (kg/j)	Production (kg/j)	Poids vif (kg)
Expérimentation A					
Bloc 1 ^a	Multipares	90 ± 35	19.6 ± 1.9	33.0 ± 4.8	682 ± 62
Bloc 2	Multipares	30 ± 8	15.6 ± 1.0	35.6 ± 3.4	631 ± 10
Bloc 3	Primipares	77 ± 4	16.2 ± 1.4	22.7 ± 6.4	575 ± 73
Expérimentation B					
Bloc 1	Multipares	7 ± 1	17.2 ± 0.6	31.0 ± 2.1	639 ± 12
Bloc 2	Primipares	10 ± 1	9.0 ± 0.2	14.4 ± 0.5	494 ± 6
Bloc 3	Multipares	4 ± 0	15.8 ± 6.0	31.9 ± 2.2	690 ± 7
Bloc 4	Multipares	7 ± 4	17.5 ± 4.2	37.3 ± 0.4	619 ± 7
Bloc 5	Primipares	9 ± 1	12.1 ± 3.6	24.0 ± 0.9	536 ± 1
Bloc 6	Multipares	8 ± 1	18.3 ± 1.4	39.3 ± 1.2	666 ± 36
Bloc 7	Multipares	7 ± 4	16.5 ± 0.1	28.4 ± 2.9	526 ± 70
Bloc 8	Multipares	8 ± 0	12.4 ± 3.0	21.0 ± 3.3	555 ± 13
Bloc 9	Primipares	7 ± 1	13.3 ± 0.4	24.0 ± 0.4	510 ± 37
Bloc 10	Multipares	6 ± 4	19.2 ± 2.6	38.4 ± 3.2	673 ± 80
Expérimentation C					
Bloc 1	Multipares	21 ± 6	16.8 ± 1.9	30.6 ± 2.7	650 ± 41
Bloc 2	Multipares	20 ± 5	18.6 ± 2.0	35.0 ± 5.5	670 ± 56
Bloc 3 ^a	Multipares	137 ± 140	17.4 ± 3.1	23.6 ± 6.7	625 ± 90
Bloc 4	Multipares	19 ± 9	21.7 ± 1.4	40.0 ± 8.4	680 ± 62

^a bloc composé de vaches munies d’une canule ruminale

Tableau 19 : Composition et valeur nutritive des rations

Intitulé des traitements	Expérimentation A			Expérimentation B		Expérimentation C			
	13.0	14.5	16.0	13.0	14.0	N bas, E basse	N bas, E haute	N haut, E basse	N haut, E haute
Composition (% MS totale)									
Ensilage de maïs	30.9	28.1	26.8	67.2	67.8	54.1	59.9	52.4	53.3
Ensilage d'herbe	43.2	40.6	38.7	-	-	29.0	13.9	28.1	12.4
Blé	-	-	-	15.3	11.4	10.9	14.0	8.8	17.4
Tourteaux formolés ¹	8.4	13.2	17.1	2.5	8.3	-	-	-	-
Maïs grain	16.6	17.6	16.8	-	-	-	4.2	-	5.0
Tourteau de soja	-	-	-	9.5	7.2	4.5	6.6	9.2	10.6
Paille de blé	-	-	-	3.9	3.8	-	-	-	-
Minéraux ²	0.9	0.6	0.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	1.2
Valeur nutritive									
MAT (%)	13.0	14.7	16.3	12.9	14.0	11.8	12.2	13.7	14.2
PDIN ³ (g/kg MS)	89	104	117	81	99	75	80	89	94
PDIE ³ (g/kg MS)	100	114	125	88	108	84	89	92	98
PDIA ⁴ (g/kg MS)	49	63	74	43	55	29	33	37	42
UFL ⁵ (/kg MS)	0.89	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.95	0.92	0.98

¹ Formule commerciale de tourteaux de soja et colza (80/20)

² Mélange contenant 6% P, 24% Ca, 1% Na, 5% Mg, 1% S, 0.38% Zn, 0.25% Mn, 0.1% Cu, 0.006% I, 0.003% Co et 0.001% Se ainsi que CaCO₃

³ Protéines Digestibles dans l'Intestin quand l'Azote (PDIN) ou l'Energie (PDIE) fermentescible au niveau ruminal est limitant (Andrieu et Demarquilly, 1987).

⁴ Protéines Digestibles dans l'Intestin d'origine Alimentaire (Andrieu et Demarquilly, 1987).

⁵ Unité Fourragère Lait corrigée des interactions alimentaires (Vermorel et al., 1987).

l'expérimentation B, les vaches entrent en essai à une semaine de lactation fixe. Les mesures ont lieu toutes les semaines pour l'ingestion, la production et la composition du lait et les semaines 3, 6, 9, 12, 15 et 18 de lactation de chaque vache pour d'autres paramètres (paramètres sanguins, digestibilité apparente).

I.4.1. Ingestions et aliments

Les ingestions brutes individuelles sont enregistrées tous les jours après la période de transition. Quotidiennement, des échantillons des rations et des refus sont prélevés en vue de déterminer leur teneur en MS (48h à 105°C). Un échantillon de chacun des aliments de la ration distribuée est prélevé à chaque semaine de mesures ou à chaque changement de lot lors des différents essais. Les aliments sont séchés (48h à 80°C) et broyés puis leur composition chimique est déterminée : l'azote total par la méthode de Kjeldahl sur des prises d'essai de 100 à 200 mg, les fibres NDF par la méthode de Van Soest et Wine (1967) sur des prises d'essai d'1 g ainsi que pour la cellulose brute par la méthode de Weende, les cendres totales par calcination à 550°C pendant 5 h sur des prises d'essai d'1g. Les valeurs UFL et PDI des rations sont calculées respectivement selon les équations proposées par Andrieu et Demarquilly (1987) et Sauvant et al. (1987). Les valeurs UFL des rations sont corrigées des interactions alimentaires selon Vermorel et al. (1987). L'association de l'ingestion en MS et des teneurs en azote, PDI, UFL permet d'obtenir l'ingestion individuelle de chacun de ces composants.

I.4.2. Production laitière et composition du lait

Pour l'expérimentation C, des prélèvements de lait lors des 15^{ème} et 16^{ème} traites après le vêlage sont analysés pour déterminer leur taux protéique et butyreux et leur concentration cellulaire, les données étant utilisées comme co-variables centrées par bloc lors du traitement des résultats.

Pour l'ensemble des essais, la production laitière est enregistrée de façon automatique et individuelle à chaque traite (Système Isalait 2045, Boumatic). Des prélèvements de lait sont effectués sur 4 traites consécutives chaque semaine de mesures. Le prélèvement est réalisé tout au long de la traite, de façon à ce que l'échantillon (environ 250 mL) soit représentatif de l'ensemble du lait produit. Le lait ainsi prélevé est pour partie (environ 30 mL) conservé à 4°C dans des flacons contenant une pastille de bichromate de potassium (D & F control systems, Inc. California, USA) en vue de la mesure des taux (TB, TP et concentration

cellulaire) et le restant du prélèvement est pris en charge au laboratoire.

Les mesures sont réalisées sur des échantillons pondérés sur 24 heures. Les teneurs en azote total du lait et en azote non protéique sont déterminées selon les normes AFNOR NF V 04-211 (1971) et FIL 20B (1993), respectivement. La fraction protéique du lait est séparée de la fraction non protéique par précipitation des protéines avec l'acide trichloracétique 15%. La fraction protéique du lait est obtenue par différence entre l'azote total et l'azote non protéique. Le dosage de l'urée est réalisé, à partir du défécate d'ANP, par méthode colorimétrique d'après Siest (1968) avec du diacétylmonoxime uréique comme réactif et à une longueur d'onde de 480 nm.

Les taux butyreux et protéique sont déterminés sur chaque échantillon prélevé par analyse infrarouge (appareil Milkoscan 605, Foss Electric, Hillerød, Denmark). La concentration cellulaire est obtenue par comptage des noyaux après coloration (appareil Fossomatic 360, Foss Electric, Hillerød, Denmark) par un laboratoire interprofessionnel agréé.

I.4.3. Digestibilité apparente

La MS fécale de la ration est estimée à l'aide d'un marqueur interne : les cendres insolubles dans l'acide chlorhydrique (HCl) 2N. Ce paramètre, représentatif de la fraction indigestible des aliments est considéré comme un très bon marqueur pour estimer la quantité de fèces excrétée par les bovins (taux de recouvrement proche de 100%) et ce, pour des rations composées de proportions variables en fourrages et en concentrés (Thonney et al., 1979). Des échantillons individuels de fèces (environ 500 g) recueillis durant la semaine de mesures matin et soir, deux jours consécutifs, sont immédiatement congelés. Ces échantillons sont lyophilisés et regroupés par vache. Les cendres insolubles dans l'HCl 2N et l'azote total sont dosés sur le produit lyophilisé.

Les cendres insolubles dans l'HCl 2N sont déterminées pour tous les aliments contenus dans les rations ainsi que pour les échantillons de fèces par la méthode décrite par Van Keulen et Young (1977). Les teneurs en azote des fèces sont déterminées par la méthode de Kjeldahl sur un échantillon lyophilisé et séché d'environ 250 mg.

I.4.4. Prélèvements sanguins

Les prélèvements sanguins sont réalisés au niveau de la veine caudale dans des tubes héparinés sous vide (Vacutainer, Preanalytical Solutions, Plymouth, Grande Bretagne). Ils ont

lieu après l'accès à l'alimentation à un temps donné pour les expérimentations A et B (4 heures), et en cinétique pour l'expérimentation C (0, 4 et 8 heures). Les échantillons sont immédiatement centrifugés (6000 g, 10 min.). Le plasma est alors recueilli et des aliquotes sont congelés à -80°C avant la détermination des concentrations en urée, en β -OH-butyrate et acéto-acétate, en acides gras non estérifiés et en glucose (Tableau 20). Pour l'expérimentation C, l'urémie est dosée sur le plasma de tous les prélèvements. La teneur en acides gras non estérifiés (AGNE) est déterminée pour toutes les vaches à partir de l'échantillon prélevé avant l'accès à l'auge (T0). Les teneurs plasmatiques en AGNE, en glucose, en acéto-acétate ainsi qu'en β -hydroxy-butyrate sont mesurées pour les trois temps sur les échantillons des vaches possédant une canule ruminale.

Après décongélation du plasma, sont mesurées les teneurs en urée par colorimétrie (Kit UR 222, Société Randox, Montpellier, France), en β -OH-butyrate et acéto-acétate (formation de NADH et mesure sur spectrophotomètre à 340 nm), en acides gras non estérifiés (Kit 46551, Unipath) et en glucose (Kit 06GL8, Biolabo, Fismes, France).

I.4.5. Fermentation ruminale

Une cinétique postprandiale de la composition du jus de rumen est réalisée chez les vaches munies d'une canule ruminale lors des expérimentations A et C. Un premier prélèvement de jus de rumen est effectué le matin (temps 0) avant l'accès à l'alimentation juste après la traite par une sonde rigide (60 cm) via la canule du rumen puis à différents temps après l'accès à l'alimentation: 0.5, 1, 2, 4, 6 et 8 heures pour l'expérimentation A et 1, 2, 4, 5, 6, 8, et 10 heures pour l'expérimentation C de façon à davantage encadrer la période des prises alimentaires principales (Figure 19). Les mesures du pH du jus du rumen sont effectuées juste après le prélèvement (Knick Portamess n° 751, électrode Xerolyt Ingold n° M6- DXK S7/25). La phase liquide est ensuite séparée des particules solides par centrifugation (4000g, 20 min) et immédiatement congelée dans l'attente du dosage des teneurs en ammoniac et en acides gras volatils.

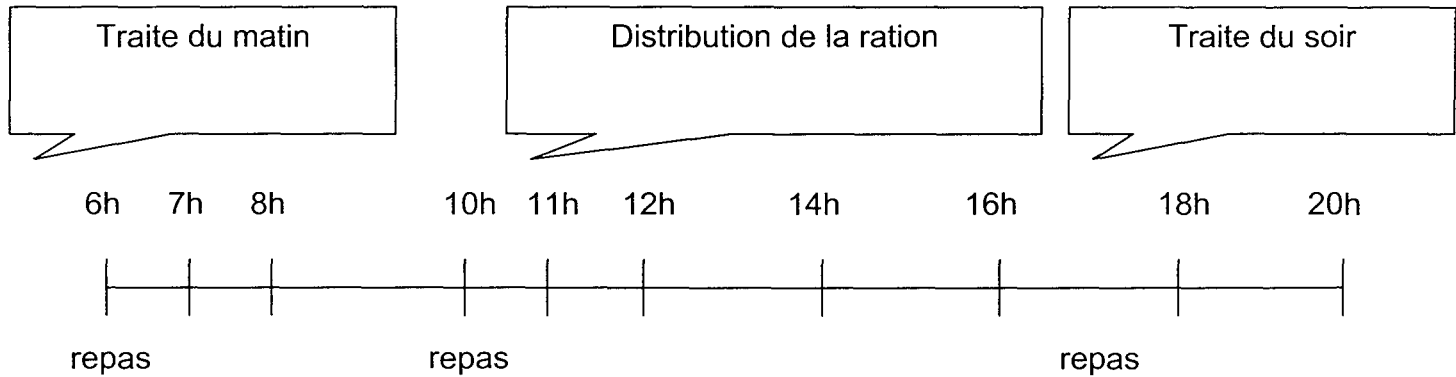
Les acides gras volatils (AGV) sont dosés par chromatographie en phase gazeuse (colonne capillaire SGE BP21) à flamme ionisante à partir d'un mélange de 400 μ L d'échantillon + 50 μ L d'acide orthophosphorique 1% (volatilisant) + 50 μ L de 4 méthyl valérate (étalon interne) selon Jouany (1982). Le volume d'injection est de 0.2 μ L et la température d'injection de 240°C. Le gaz vecteur est l'hélium et la température de la colonne suit un gradient de 100 à 112°C à raison de 2°C/min. La température du détecteur est de 250°C.

Tableau 20 : Dosages effectués sur les échantillons de plasma

	Expérimentation A	Expérimentation B	Expérimentation C
Urée	x	x	x
β -OH-butyrate			x
Acéto-acétate			x
Acides gras non estérifiés		x	x
Glucose			x

x : réalisation du dosage

Figure 19: Organisation des prélèvements de jus de rumen dans la journée



Expérimentation

A	T0	T1	T2	T4		T6		T8	
	T0.5								
C	T0	T1	T2	T4	T5	T6	T8		T10

La concentration en ammoniac est obtenue par lecture directe grâce à une électrode spécifique au gaz ammoniac (Orion, modèle 95-12). L'électrode est calibrée par des solutions de sulfate d'ammonium (10^{-1} à 10^{-5} M) préparées le jour même. La lecture est réalisée après alcalinisation des échantillons juste avant le dosage : 100 mL d'échantillon + 2 mL de solution alcanisante (ionic strength adjusting, 951211, Thermo Orion, Beverly, USA).

I.4.6. Dégradation ruminale

La technique des sachets nylon (Michalet-Doreau et al., 1987) a été employée pour mesurer la disparition dans le rumen des fractions organique et azotée des différentes rations employées dans les expérimentations A et C. Quatre grammes des rations reconstituées à partir des aliments individuels séchés 48 heures à 60°C et broyés sur un tamis de 1.5 mm, sont placés dans des sachets de 9 x 14 cm (porosité 50µm, Blutex 120, Saati France, Saily Saillisel, France). Chaque ration est testée sur une vache munie d'une canule ruminale et recevant cette même ration. Les incubations ont été réalisées à la fin de la dernière période de l'essai durant 5 jours consécutifs afin de perturber le moins possible l'équilibre de la flore ruminale et les animaux pendant les mesures. Le taux de disparition instantanée (temps 0) a été obtenu par un lavage de 2 x 5 min à l'eau tiède. Les temps d'incubation dans le rumen sont de 1, 3, 6, 12, 24 et 48 heures. L'accès à l'alimentation a été donné juste après la mise en place des sachets, ainsi pour chaque mesure le repas principal (après la traite du matin) est inclus dans le temps d'incubation. Après incubation, les sachets sont lavés 2 x 5 min à l'eau froide. L'ensemble des sachets (9 répétitions par temps et par traitement) est ensuite congelé puis lyophilisé. Les résidus des rations sont pesés et regroupés par temps pour chaque traitement pour la mesure des teneurs en cendres totales et en azote.

I.4.7. Excrétion urinaire

L'urine de chaque vache (expérimentations A et C) est recueillie en totalité sur une période de 48 heures consécutives à la fin de chaque période de mesures. Les vaches sont alors attachées à l'aide d'un licol dans des logettes paillées avec des apports permanents en eau et en aliments. Elles sont munies de sondes urinaires souples (Eschmann Healthcare Hythe, Kent, England, Ref 41-515-42) positionnées au-delà du sphincter de la vessie. Les sondes sont maintenues en place grâce à un ballonnet situé à l'extrémité et gonflé par un système de double paroi. L'urine est collectée dans des bidons dans lesquels sont préalablement placés 200 mL d'acide sulfurique 30% afin de conserver le pH inférieur à 4 et ainsi limiter

l'évaporation d'azote sous forme d'ammoniac. Toutes les 12 heures, l'urine excrétée est pesée puis un échantillon est congelé. Les échantillons sont pondérés sur 24 heures après décongélation et filtration sur filtre papier plissé (Fisherbrand). Le dosage de l'azote de l'urine est réalisé après dilution au 1/20^{ème}. La teneur en urée de l'urine est déterminée avec la méthode de Siest (1968) à partir d'un échantillon dilué au 1/200^{ème}.

I.4.8. Performances zootechniques

Sont entendues comme performances zootechniques des animaux les caractéristiques de production laitière (production, taux protéique et butyreux) ainsi que les variations de poids vif exprimées par le gain moyen quotidien (GMQ). Pour mesurer ce dernier paramètre, les vaches sont pesées en période pré-expérimentale et chaque semaine de mesures (expérimentations A et C) ou lors des semaines de lactation 6, 12 et 18 (expérimentation B). Les pesées sont réalisées deux jours consécutifs à la même heure (14 heures).

II. Calculs

II.1. Digestibilité apparente de la MS et de l'azote

Par définition, la quantité ingérée du marqueur est retrouvée dans les fèces. Pour chaque aliment, la teneur en cendres insolubles dans l'HCl 2N est associée à la quantité de MS ingérée. Le calcul de la quantité de MS fécale est le suivant :

$$\text{Quantité de fèces (en kg de MS /j)} = \frac{\text{Quantité de cendres insolubles ingérées}}{\text{Teneur en cendres insolubles des fèces}}$$

La digestibilité apparente de l'azote de la ration correspond au rapport :

$$\text{Digestibilité apparente de l'azote (\%)} = 100 \times \left(1 - \frac{\text{Teneur en azote des fèces} \times \text{Quantité de fèces}}{\text{Quantité d'azote ingéré}} \right)$$

II.2. Dégradabilité ruminale

La dégradabilité ruminale est étudiée à partir des paramètres du modèle d'Ørskov et McDonald (1979). Ces derniers sont déterminés à partir des taux de disparition des différentes fractions des rations reconstituées obtenus lors des études cinétiques de disparition *in sacco*.

Ces paramètres sont :

- a : fraction instantanément disparue dans le rumen (%)
- b : fraction progressivement dégradable dans le rumen (%)
- c : vitesse de disparition de la fraction progressivement dégradable (%/h)
- DT : dégradabilité théorique (%)

avec l'équation de la dégradabilité théorique :

$$DT \text{ (\%)} = \left(a + \frac{bc}{c + k_p} \right)$$

k_p étant la vitesse du transit estimée à 6%/h.

La détermination des valeurs a, b, c et DT est réalisée par itérations successives du modèle mono-moléculaire (Stat-ITCF, version 5.0).

II.3. Taux de couverture des besoins

Les taux de couverture des besoins sont calculés à posteriori. Ils correspondent au rapport entre les apports (mesurés par l'ingestion en MS et les teneurs azotée et énergétique de la ration) et les besoins de l'animal (établis à partir des équations des systèmes UFL et PDI (INRA, 1988) et des mesures de production et de poids vif).

II.3.1. Taux de couverture azoté

Les besoins totaux en azote correspondent à la somme des besoins d'entretien, de production, de gestation et de croissance exprimés selon Vérité et al. (1987) (en g de PDI/jour):

- Besoins d'entretien = $95 + 0,5 \times \text{Poids vif (kg)}$
- Besoins de production = $(\text{TP du lait (g/kg)} \times \text{Production de lait (kg/j)}) / 0,64$
- Besoins de gestation = 470 g en 7^{ème} mois de gestation
 530 en 8^{ème} mois de gestation
 600 en 9^{ème} mois de gestation
- Besoins de croissance = 300 g / kg de GMQ

Un taux de couverture est calculé séparément pour les besoins en PDIE et en PDIN.

Dans les deux types d'analyse de variance, les modalités sont comparées sur la base des moyennes ajustées par le modèle par un test t de Student. L'effet des facteurs est testé avec la somme des carrés des écarts de type III. Le seuil de signification de 0.05 est retenu.

En ce qui concerne l'expérimentation B, l'ensemble des paramètres est traité avec une analyse de variance avec utilisation de l'option des mesures répétées. La procédure utilisée, la modalité de comparaison des moyennes, le test des effets des facteurs et le seuil de signification sont les mêmes que ceux utilisés pour les expérimentations A et C. Les facteurs étudiés sont le niveau azoté, le stade de lactation et l'interaction des deux. Le bloc est un facteur contrôlé. Des co-variables centrées par blocs sont intégrées dans le modèle lorsque leur effet est significatif. Le GMQ de chaque intervalle a été traité isolément c'est à dire que l'option des mesures répétées ainsi que les facteurs étudiés « stade de lactation » et « interaction stade x niveau de MAT » ont été supprimés dans le modèle.

Partie expérimentale

Expérimentation A

« Distribution de l'azote entre le lait, les fèces et l'urine selon le niveau de MAT de la ration »

I. Objectifs

Dans cet essai, la distribution de l'azote de la ration entre le lait, les fèces et l'urine est étudiée. L'hypothèse de travail émise à partir des données bibliographiques, est qu'une diminution de la teneur en MAT de la ration engendre une excrétion inférieure dans l'environnement et par conséquent un taux de fixation dans le lait supérieur et peut-être aussi une diminution de la production. Pour cette première approche, trois niveaux de MAT sont testés (intitulés 13.0, 14.5 et 16.0 % MAT) de façon à observer dans quelle mesure les variations des apports en azote influent sur la sécrétion d'azote dans le lait, l'excrétion dans les fèces et l'urine ainsi que sur la production laitière. L'écart entre les niveaux retenus est important (plus de 3 points) de manière à étendre la plage des réponses et augmenter la probabilité de mettre en évidence des différences. Les trois rations utilisées présentent des déficits similaires d'azote fermentescible par rapport à l'énergie fermentescible. Les apports en PDIN doivent être similaires entre les traitements, il en est de même pour les apports en PDIE. Les valeurs énergétiques sont similaires et les mêmes constituants de la ration sont utilisés de façon à ce que seules les proportions diffèrent entre les traitements. Ce faisant, la synthèse microbienne peut être considérée équivalente. La principale différence entre les rations est alors en terme de protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire (PDIA). Un tiers de l'effectif de vaches utilisées est en première lactation de façon à être proche des conditions d'un troupeau moyen.

II. Résultats

II.1. Production et composition du lait

II.1.1 Production

Les quantités de lait brut produites tendent à augmenter (de 30.7 à 32.7 kg/j) avec le niveau croissant de MAT de la ration surtout entre les traitements 14.5 et 16.0% MAT (NS, Tableau

21). La forte variabilité individuelle ($ETR=2,7$) et une puissance statistique insuffisante (27%) ne permettent pas de mettre en évidence des différences significatives entre les traitements. La production de lait standard à 4% de matière grasse est significativement plus élevée ($P<0.01$) pour le traitement le plus concentré en MAT (30.7 et 30.8 contre 34.3 kg/j pour les traitements 13.0, 14.5 et 16.0% MAT respectivement).

II.1.2. Composition du lait (Taux, Quantité de matière)

Le taux protéique du lait est significativement ($P<0.05$, Tableau 21) plus élevé pour le traitement 16.0% MAT (29.9 g/kg) que pour le traitement 13.0% MAT (28.9 g/kg), le niveau intermédiaire ne se distinguant pas des deux autres (29.5 g/kg). Les quantités de matière protéique produite sont légèrement croissantes entre les traitements 13.0 et 14.5% MAT (880 et 914 g/j respectivement), et toutes deux significativement ($P<0.01$) plus faibles que celle du traitement 16.0% MAT (989 g/j).

Les taux butyreux, compris entre 40.0 et 41.8 g/kg, ne sont pas différents (NS, Tableau 21) pour les trois traitements. La puissance de l'essai est modeste pour ce paramètre (36%). En revanche, la quantité de matière grasse est significativement plus élevée ($P<0.01$) pour le traitement à 16.0% MAT (1402 g/j) que pour les deux autres traitements (1233 et 1289 g/j, respectivement) qui ne se distinguent pas entre eux.

Les concentrations cellulaires du lait ne sont pas affectées par le niveau de MAT de la ration (NS, Tableau 21).

II.1.3. Composition azotée

Les concentrations en azote total et en azote protéique du lait augmentent avec la teneur en MAT de la ration. Leurs valeurs sont significativement plus faibles pour les traitements 13.0 et 14.5% MAT ($P<0.01$) que celles obtenues pour le traitement 16.0% MAT (Tableau 22). L'ANP et l'urée du lait présentent des concentrations significativement croissantes avec le niveau azoté de la ration. Les valeurs des trois traitements sont significativement différentes ($P<0.01$).

Les quantités d'azote total sécrétées dans le lait (Tableau 22) obtenues pour les traitements 13.0 et 14.5% MAT ne sont pas différentes entre elles, mais elles sont inférieures à la valeur du traitement 16.0% MAT (138 et 143 contre 158 g/j pour les trois traitements

**Tableau 21 : Production et composition du lait
pour les différents niveaux azotés des rations**

	Traitement (%MAT)			Effet	ETR	Puissance de l'essai (%)
	13.0	14.5	16.0	Traitement		
Production (kg/j)	30.7	30.8	32.7	NS	2.7	27
Lait 4% (kg/j)	30.8 b	31.8 b	34.3 a	<0.01	2.1	
TP (g/kg)	28.9 b	29.5 ab	29.9 a	<0.05	0.7	
Matière protéique (g/j)	880 b	914 b	989 a	<0.01	64	
TB (g/kg)	40.0	41.1	41.8	NS	1.8	36
Matière grasse (g/j)	1233 b	1289 b	1402 a	<0.01	90	
Concentration cellulaire (10 ³ cellules/mL)	69	78	114	NS	51	32

ETR : Ecart-Type Résiduel

NS : Non Significatif

a, b : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0,05)

**Tableau 22 : Fractions azotées du lait (en teneur et en quantité)
pour les différents niveaux azotés des rations**

	Traitement (%MAT)			Effet	ETR
	13.0	14.5	16.0	Traitement	
Teneurs (mg/L)					
Azote total	4546 b	4647 b	4790 a	<0.01	110
Azote protéique	4304 b	4389 b	4508 a	<0.01	112
Azote non protéique	242 c	257 b	282 a	<0.01	11
Azote uréique	201 c	238 b	305 a	<0.01	27
Quantités (g/j)					
Azote total	138 b	143 b	158 a	<0.01	9
Azote protéique	131 b	135 b	149 a	<0.01	8
Azote non protéique	7.6 b	7.9 b	9.4 a	<0.01	0.9
Azote uréique	2.8 c	3.5 b	4.8 a	<0.01	0.6

ETR : Ecart-Type Résiduel

a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0,05)

respectivement, $P < 0.01$). La même hiérarchie est observée entre les trois traitements pour l'azote protéique du lait et l'azote total ($P < 0.01$). La quantité d'azote non protéique produite est plus élevée ($P < 0.01$) pour le traitement le plus riche en MAT, les autres traitements ne se distinguent pas l'un de l'autre. Les quantités d'urée du lait croissent de manière significative ($P < 0.01$) avec le niveau d'azote des rations.

II.2. Excrétion fécale

Les productions d'azote fécal (Tableau 23) sont similaires pour les traitements 13.0 et 14.5% MAT (121 et 123 g/j respectivement). L'excrétion observée pour le traitement 16.0% MAT est supérieure à celles des autres traitements (145 g/j, $P < 0.01$).

II.3. Excrétion urinaire

Les concentrations urinaires d'azote augmentent de 8.3 à 11.3 g/L ($P < 0.01$, Tableau 24) avec la teneur en MAT de la ration. La teneur en azote uréique est plus élevée ($P < 0.01$) pour le traitement 16.0% MAT (7.9 g/L) que pour les traitements 13.0 et 14.5% MAT (5.2 et 6.0 g/L, respectivement). Les quantités d'azote urinaire croissantes avec le niveau azoté de la ration (de 117 à 185 g/j), sont significativement différentes ($P < 0.01$). L'azote uréique qui représente plus de la moitié de l'azote urinaire (entre 61 et 70%) augmente significativement ($P < 0.01$) avec le niveau azoté de la ration.

II.4. Ingestion et digestibilité apparente de l'azote

L'ingestion moyenne de MS a tendance à augmenter de 17.5 à 19.1 kg/j avec la teneur en MAT de la ration (Tableau 25) sans cependant atteindre le seuil de signification ($P > 0.10$). La puissance modeste (37%) explique l'absence d'un effet significatif. Les quantités moyennes d'azote ingéré augmentent significativement ($P < 0.01$) avec la teneur en MAT de la ration. Elles sont comprises entre 370 et 499 g N/j. Le caractère isoénergétique des rations conduit à des ingestions d'énergie assez proches d'un régime à l'autre, entre 14.3 et 15.7 UFL/j (NS). La tendance à l'augmentation des quantités d'énergie ingérée lors d'apports croissants en MAT dans la ration n'atteint pas le seuil de signification.

Les quantités d'azote digéré (comprises entre 250 et 354 g/j, Tableau 23) sont significativement ($P < 0.01$) plus élevées lorsque le niveau azoté de la ration augmente. La digestibilité apparente prend une valeur significativement plus faible ($P < 0.05$) pour le

Tableau 23 : Excrétion azotée fécale pour les différents traitements

	Traitement (% MAT)			Effet	ETR
	13.0	14.5	16.0	Traitement	
Azote fécal (g/j)	121 b	123 b	145 a	<0.01	16
Azote digéré (g/j)	250 c	308 b	354 a	<0.01	34
Digestibilité apparente de l'azote (%)	67.4 b	71.1 a	70.5 a	<0.05	3.0

ETR : Ecart-Type Résiduel

a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0,05)

**Tableau 24 : Excrétion azotée urinaire (en teneur et en quantité)
pour les différents traitements**

	Traitement (% MAT)			Effet	ETR
	13.0	14.5	16.0	Traitement	
Teneurs (g/L)					
Azote total	8.3 c	9.8 b	11.3 a	<0.01	0.8
Azote uréique	5.2 b	6.0 b	7.9 a	<0.01	1.3
Quantités (g/j)					
Azote total	117 c	147 b	185 a	<0.01	16
Azote uréique	70 c	87 b	127 a	<0.01	17

ETR : Ecart-Type Résiduel

a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0,05)

Tableau 25 : Ingestion de matière sèche, d'azote et d'énergie pour les différents traitements

	Traitement (% MAT)			Effet	ETR	Puissance de l'essai (%)
	13.0	14.5	16.0	Traitement		
MS ingérée (kg/j)	17.5	18.0	19.1	NS	1.6	37
Azote ingéré (g/j)	370 c	431 b	499 a	<0.01	40	
PDIN ingérées (g/j)	1553 c	1875 b	2239 a	<0.01	171	
PDIE ingérées (g/j)	1745 c	2055 b	2392 a	<0.01	185	
PDIA ingérées (g/j)	855 c	1135 b	1416 a	<0.01	106	
Energie ingérée (UFL/j)	14.3	14.9	15.7	NS	1.4	36

ETR : Ecart-Type Résiduel

NS : Non Significatif

a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0.05)

traitement 13.0% MAT (67.4%) que pour les deux autres traitements (71.1 et 70.5%, respectivement).

II.5. Digestion ruminale des rations

De façon à vérifier les valeurs nutritives théoriques des rations, leur dégradation ruminale est étudiée par les profils fermentaires, les valeurs de pH, les teneurs en ammoniac, les disparitions *in sacco* ainsi que la dégradabilité théorique.

Les taux de disparition de la matière sèche, de la matière organique et de la matière azotée sont très proches entre les différentes rations (Figure 20). Pour la matière sèche et la matière organique (Figure 20a et b), le taux de disparition instantanée est de l'ordre de 30%. Pour la matière azotée, il est d'environ 40% (Figure 20c). Après 48 heures d'incubation, les taux de disparition de ces trois fractions atteignent près de 80%. Ces observations se retrouvent dans les paramètres de dégradation ruminale et la dégradabilité théorique (Tableau 26) calculés à partir du modèle d'Ørskov et McDonald (1979) qui prennent des valeurs assez proches entre les traitements pour chacune des fractions étudiées. Cependant, les dégradabilités théoriques de la matière sèche et de la matière organique de la ration 13.0% MAT apparaissent légèrement inférieures à celles des autres traitements.

Tableau 26 : Paramètres de dégradation ruminale des rations reconstituées selon le modèle d'Ørskov et Mc Donald (1979)

	Traitement % MAT	a %	b %	c %/h	DT %
Matière sèche	13.0	31.8	55.0	3.1	50.5
	14.5	32.2	61.2	3.6	55.2
	16.0	32.0	63.1	3.2	53.9
Matière organique	13.0	29.1	57.9	3.0	48.6
	14.5	29.6	61.9	3.7	53.3
	16.0	29.6	62.6	3.4	52.2
Matière azotée	13.0	37.4	65.8	2.3	55.5
	14.5	37.1	58.0	3.6	58.8
	16.0	36.8	63.0	2.7	56.3

a : fraction disparaissant instantanément dans le rumen

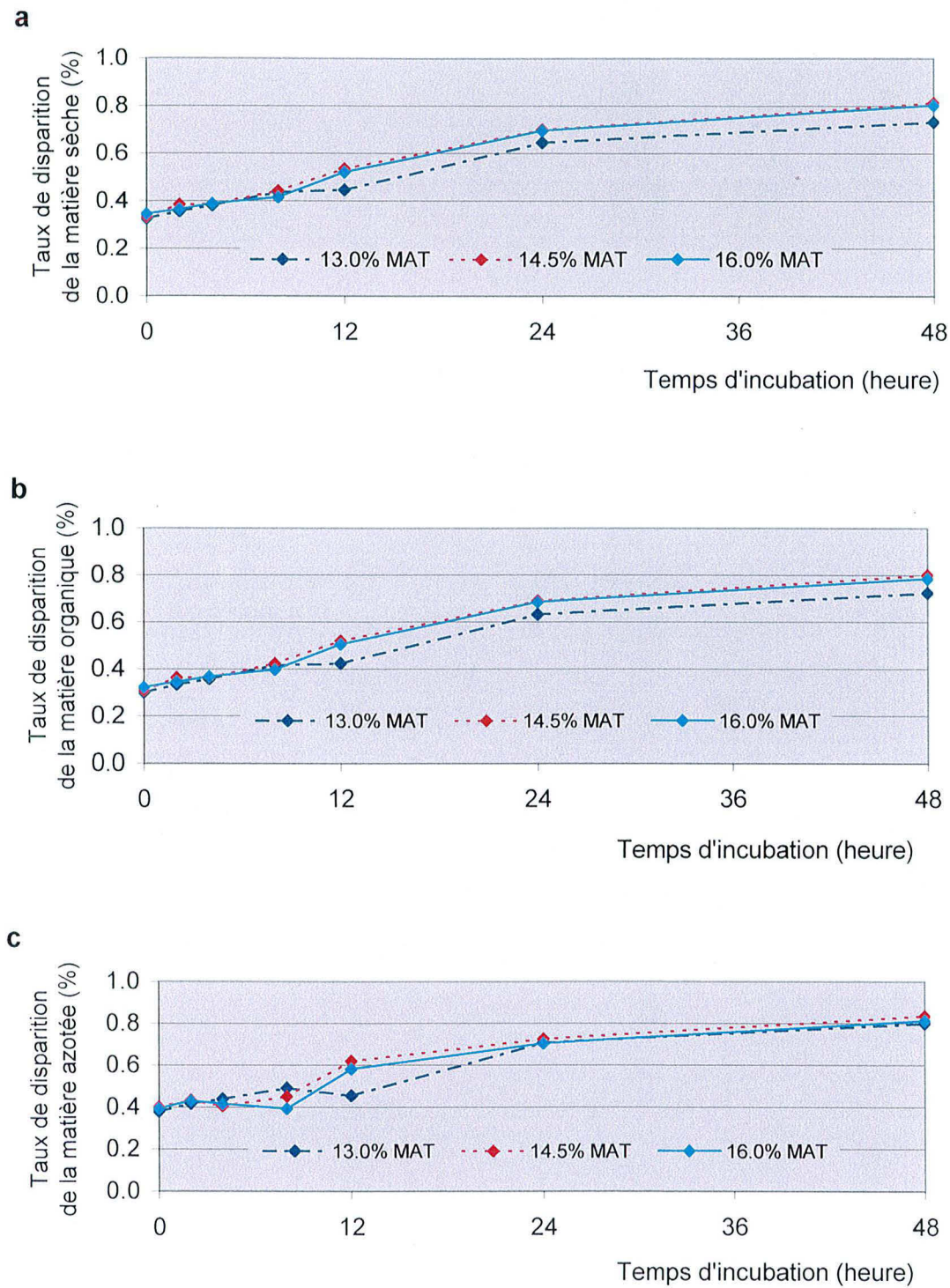
b : fraction progressivement dégradable dans le rumen

c : vitesse de disparition de la fraction progressivement dégradable

DT : dégradabilité théorique pour $k_p=0.06/h$

Pour les trois traitements, les valeurs de pH du jus de rumen restent supérieures à 6 sur l'ensemble de la cinétique (Tableau 27). La moyenne des pH mesurés avec la ration 16.0%

Figure 20: Disparition *in sacco* de la matière sèche (a), de la matière organique (b) et de la matière azotée (c) des rations reconstituées



MAT est plus faible que celle des deux autres traitements ($P < 0.01$). La baisse de pH la plus importante observée entre les temps 0 et 1 heure après l'accès à l'alimentation est du même ordre de grandeur (entre 0.43 et 0.49 point de pH) pour les différentes rations testées. La ration 16.0% MAT (qui présente la part de concentré la plus importante avec 33.9% de la MS) conduit à des valeurs de pH plus faibles mais avec des variations au cours du temps similaires à celles des autres traitements.

La concentration en ammoniac du liquide ruminal n'est pas différente entre les traitements (NS, Tableau 27). Au temps 0, la concentration est proche de 4 mmol/L. Elle augmente après la prise alimentaire pour atteindre un pic 2 heures après l'accès à l'alimentation avec des concentrations de 14 à 16 mmol/L.

Le niveau azoté de la ration n'a pas d'effet (NS, Tableau 27) sur la concentration en AGV totaux dans le rumen. Le profil ruminal des AGV montre pour le traitement 14.5 % MAT, une part relative plus élevée pour l'acétate ($P < 0.01$) et plus faible pour le butyrate ($P < 0.01$) que pour les deux autres traitements. Toutefois, l'amplitude de ces différences est faible (moins de 3 points d'écart entre les traitements en moyenne) et les variations observées au cours de la cinétique sont comparables pour l'ensemble des traitements.

Pour l'ensemble des paramètres de fermentation ruminale, les interactions entre le traitement et le temps ne sont pas significatives. Ce résultat confirme le fait que les différences entre les traitements ne varient pas au cours de la cinétique.

Les dégradations dans le rumen des trois rations apparaissant globalement proches ; ce qui traduit sans doute la similitude des conditions dans lesquelles les micro-organismes du rumen sont placés. Ceci conforte les hypothèses de travail posées d'une synthèse protéique microbienne similaire pour les trois traitements. Ainsi à ce niveau, la nature des matières azotées apportées par les rations et les niveaux de dégradation des matières organique et azotée ne constituent pas des facteurs de variation susceptibles d'expliquer d'éventuelles variations dans le devenir de l'azote ingéré.

II.6. Distribution de l'azote ingéré

Pour le traitement 13.0% MAT, la part de l'azote ingéré sécrétée dans le lait (37.4%, Tableau 28) est significativement ($P < 0.01$) plus élevée que celles des autres traitements (33.1 et 32.0%, respectivement). L'azote protéique représente 35.4% de l'azote ingéré pour le

Tableau 27 : Profil fermentaire au cours de la digestion des trois rations

Traitement (% MAT)		pH			NH3 mmol/L			AGV mmol/L			Acétate mol/100mol			Propionate mol/100mol			Butyrate mol/100mol		
		13.0	14.5	16.0	13.0	14.5	16.0	13.0	14.5	16.0	13.0	14.5	16.0	13.0	14.5	16.0	13.0	14.5	16.0
Temps (h)	0	6.85	6.92	6.60	5.2	3.9	4.6	74.2	77.1	90.1	55.6	62.3	57.9	22.1	19.0	20.7	17.0	14.1	16.2
	0.5	6.42	6.55	6.36	12.4	11.0	12.3	94.6	109.7	94.1	56.6	62.2	55.3	21.1	19.1	21.5	17.0	14.2	18.0
	1	6.36	6.43	6.17	12.6	13.8	14.2	106.8	116.1	123.6	56.7	60.7	58.2	21.4	20.0	20.8	16.4	14.7	16.0
	2	6.41	6.53	6.23	14.8	13.8	15.6	101.0	104.5	115.4	54.3	55.6	54.8	22.6	22.4	22.1	17.0	16.2	17.4
	4	6.37	6.44	6.09	6.8	8.8	9.1	100.3	91.6	101.3	55.7	57.3	58.0	22.2	21.5	20.7	16.5	16.0	16.0
	6	6.37	6.54	6.30	7.8	7.8	8.0	92.6	84.9	95.7	54.7	54.7	53.9	21.7	22.8	22.7	16.9	16.7	17.6
	8	6.20	6.23	6.31	5.7	9.4	7.7	96.3	103.4	102.7	52.0	56.9	52.7	23.6	21.5	23.5	18.1	16.6	18.2
	Moyenne	6.42 ^a	6.52 ^a	6.29 ^b	9.4	9.8	10.2	95.2	98.2	103.2	55.1 ^b	58.2 ^a	55.8 ^b	22.1	20.9	21.7	17.0 ^a	15.5 ^b	17.1 ^a
Effets	Trait.	<0.01			NS			NS			<0.01			NS			<0.01		
	Temps	<0.01			<0.01			<0.01			<0.01			<0.01			<0.05		
	Trait x Temps	NS			NS			NS			NS			NS			NS		
	ETR	0.01			1.3			40.6			1.4			0.4			0.4		

ETR : Ecart-Type Résiduel

NS : Non Significatif

a, b : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0,05)

traitement 13.0% MAT. Cette part est significativement plus élevée ($P<0.01$) que celles des traitements 14.5 et 16.0% MAT (31.3 et 30.1% respectivement). La fraction non protéique de l'azote du lait, voisine de 2% de l'azote ingéré, est différente ($P<0.05$) entre les traitements 13.0% MAT (2.0%) et 14.5% MAT (1.8%) ; le traitement 16.0% MAT ne se distingue ni de l'un ni de l'autre. L'urée du lait représente de 0.7 à 1.0% de l'azote ingéré. Ce rapport est plus élevé pour le niveau le plus riche en MAT ($P<0.01$) que pour les autres.

L'excrétion urinaire représente 31.7% de l'azote ingéré pour le traitement 13.0% MAT, valeur significativement plus faible que celle obtenue pour le traitement 16.0% MAT (37.4%). Le traitement 14.5% MAT, avec 34.2% de l'azote ingéré excrété dans l'urine, ne se distingue pas des deux traitements extrêmes. L'azote fécal représente une part de l'ingéré plus importante pour le traitement 13.0% MAT (32.6%, $P<0.05$) que pour les autres traitements (28.8 et 29.5% respectivement).

II.7. Distribution de l'azote digéré

La quantité d'azote sécrétée dans le lait (Tableau 29) représente une part de l'azote digéré plus élevée pour le traitement 13.0% MAT (56.3%, $P<0.01$) que pour les autres (46.9 et 46.2% respectivement). La valorisation de l'azote digéré en protéines du lait est également supérieure pour ce traitement (53.3% contre 44.3 et 43.5% respectivement, $P<0.01$). L'ANP du lait représente une part significativement plus élevée ($P<0.05$) pour le traitement 13.0% MAT (3.0%) que pour les autres traitements (2.6 et 2.7% respectivement), malgré des écarts faibles. A l'inverse de ces résultats, l'urée excrétée dans le lait représente une part de l'azote digéré plus importante (1.4%, $P<0.01$) pour le niveau 16.0% MAT dans la ration par rapport aux deux autres niveaux (1.1% pour les deux traitements).

L'excrétion urinaire est croissante avec le niveau azoté de la ration de 47.3 à 53.5% de l'azote digéré sans que les valeurs diffèrent significativement (NS). Cependant la puissance statistique de cette comparaison est modeste (31.2%). Elle est sous doute insuffisante pour observer une différence significative.

II.8. Taux de couverture, Urémie

Les taux de couverture des besoins en PDIN et en PDIE sont croissants avec le niveau de MAT de la ration : de 88 à 119% des besoins en PDIN, et de 100 à 130% des besoins en PDIE. Ils sont significativement différents entre les traitements ($P<0.01$, Tableau 30). Les

Tableau 28 : Distribution de l'azote ingéré dans le lait, l'urine et les fèces
pour les trois traitements

Distribution (en %)	Traitement (% MAT)			Effet	ETR
	13.0	14.5	16.0	Traitement	
N lait / N ingéré	37.4 a	33.1 b	32.0 b	<0.01	2.0
N protéines lait / N ingéré	35.4 a	31.3 b	30.1 b	<0.01	1.9
ANP lait / N ingéré	2.0 a	1.8 b	1.9 ab	<0.05	0.1
N uréique lait / N ingéré	0.7 b	0.8 b	1.0 a	<0.01	0.1
N urinaire / N ingéré	31.7 b	34.2 ab	37.4 a	<0.05	4.4
N urée urine / N ingéré	18.8 b	20.3 b	25.6 a	<0.01	3.9
N fécal / N ingéré	32.6 a	28.8 b	29.5 b	<0.05	3.0

ETR : Ecart-Type Résiduel

a, b : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0,05)

Tableau 29 : Distribution de l'azote digéré dans le lait et ses fractions et dans l'urine
pour les trois traitements

Distribution (en %)	Traitement (% MAT)			Effet	ETR
	13.0	14.5	16.0	Traitement	
N lait / N digéré	56.3 a	46.9 b	46.2 b	<0.01	5.1
N protéines lait / N digéré	53.3 a	44.3 b	43.5 b	<0.01	4.9
ANP lait / N digéré	3.0 a	2.6 b	2.7 b	<0.05	0.3
N uréique lait / N digéré	1.1 b	1.1 b	1.4 a	<0.01	0.1
N urinaire / N digéré	47.3	48.5	53.5	NS	7.2
N urée urine / N digéré	27.9 b	28.9 b	36.5 a	0.01	5.9

ETR : Ecart-Type Résiduel

NS : Non Significatif

a, b : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0,05)

apports énergétiques des rations permettent la couverture de 82 à 85% des besoins des animaux sans que les traitements diffèrent significativement.

L'urémie est croissante ($P < 0.01$, Tableau 30) avec les apports en MAT de la ration.

Tableau 30 : Taux de couverture des besoins azotés et énergétiques, et teneur en urée plasmatique pour les trois traitements

	Traitement (% MAT)			Effet	ETR
	13.0	14.5	16.0	Traitement	
Taux de couverture (%)					
PDIN	88 c	105 b	119 a	<0.01	8
PDIE	98 c	114 b	127 a	<0.01	8
UFL	82	84	85	NS	7
Urémie (g/L)	0.24 c	0.28 b	0.36 a	<0.01	0.03

ETR : Ecart-Type Résiduel

NS : Non Significatif

a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes ($P < 0,05$)

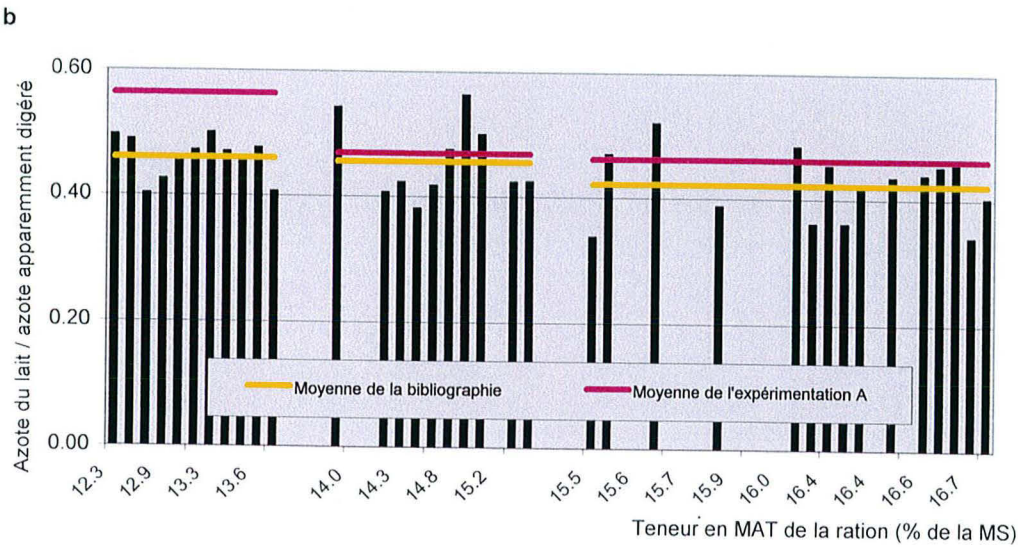
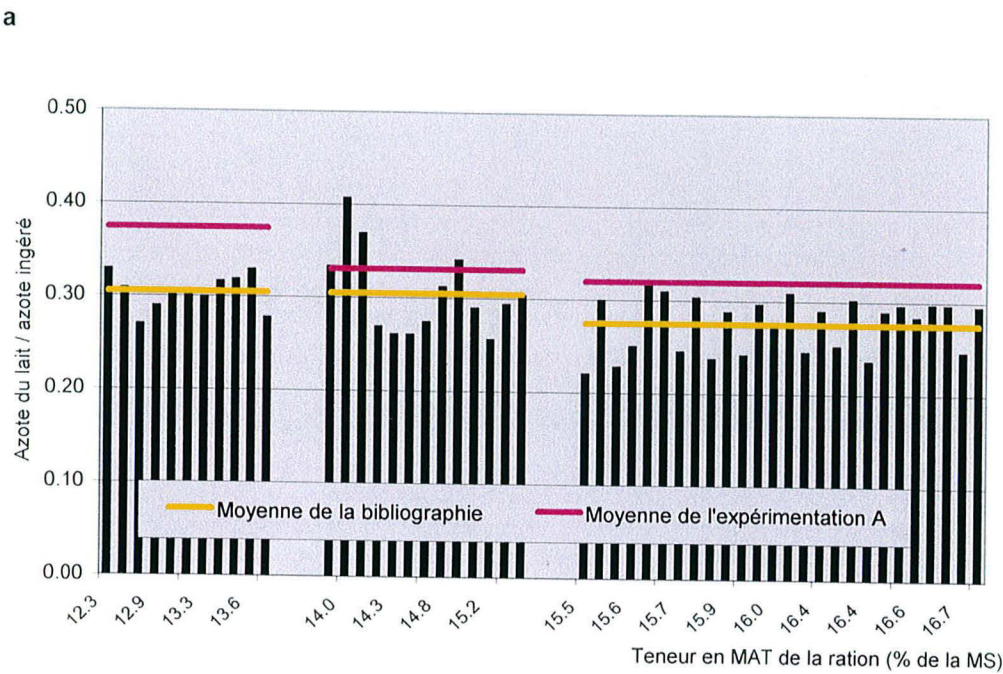
III. Discussion

L'augmentation de la teneur en MAT de la ration conduit à des quantités croissantes d'azote total et d'azote protéique sécrétées dans le lait. Ces résultats sont en accord avec ceux de Susmel *et al.* (1995), Wright *et al.* (1998) et Fisher *et al.* (2000). Une approche globale de la littérature montre une corrélation faible entre ces deux paramètres avec une augmentation des quantités sécrétées dans le lait davantage liée à l'ingestion d'azote (Figure 12). Les quantités d'azote excrétées via les fèces et l'urine sont croissantes avec la teneur en MAT de la ration. L'augmentation de l'excrétion urinaire d'azote a été montrée par Van Vuuren *et al.* (1993), Dinn *et al.* (1998) et Kebreab *et al.* (2000) de manière particulièrement marquée. Par contre, l'excrétion fécale d'azote est beaucoup moins corrélée à la teneur en MAT de la ration (Susmel *et al.*, 1995 ; Peyraud *et al.*, 1997 ; Volden, 1999 et Castillo *et al.*, 2001b). Pour cette variable, une équation de prédiction de l'excrétion fécale d'azote a pu être établie d'après la bibliographie à partir de la teneur en MAT de la ration et du niveau d'ingestion d'azote ($r^2 = 0.60$) même si la nature des apports protéique est un facteur important de variations.

La dégradation ruminale des fractions azotée et organique des rations reconstituées est proche entre les traitements. Une teneur en ammoniac d'environ 3 mmol/L dans le rumen est reconnue comme suffisante par Satter et Slyter (1974) et Hoover (1986) pour assurer une croissance microbienne maximale. Les concentrations moyennes observées ici sont largement supérieures, de l'ordre de 10 mmol/L. Sauvant *et al.* (1999) admettent qu'avec une valeur moyenne de pH de 6.25, aucun risque d'acidose ruminale n'est encouru. Les auteurs précisent que cette valeur moyenne correspondrait à une durée d'environ 4 heures par jour pendant laquelle les pH se situeraient en-dessous de 6. Dans cet essai, pour tous les traitements, il n'y a pas de valeur inférieure à 6 au cours de la cinétique qui comprend les repas principaux, et les moyennes sont supérieures à 6.25. L'étude de la dégradation *in sacco* des rations montre pour chacune des fractions étudiées (matière sèche, matière organique et matière azotée) des taux de disparition assez proches au cours de la cinétique. L'ensemble de ces résultats semble indiquer des conditions de milieu favorables au développement des micro-organismes et par conséquent favorables à la dégradation des rations. Seuls de faibles écarts de dégradabilité théorique existent entre les régimes. L'ingestion d'azote augmentant avec le niveau de MAT de la ration, il peut être suggéré que la principale différence entre les trois rations porterait sur la quantité de protéines d'origine alimentaire sortant du rumen (PDIA).

Le rapport entre l'azote sécrété dans le lait et l'azote ingéré diminue avec la teneur en azote de la ration comme l'ont déjà montré Van Vuuren *et al.* (1993), Wright *et al.* (1998) et Frank *et al.* (2002). La Figure 21a propose une comparaison de nos résultats avec ceux de la bibliographie (teneur en MAT $\pm$ 0.7). Le détail des données bibliographiques est présenté en Annexe 1. Les parts de l'azote ingéré que représentent les sécrétions d'azote dans le lait sont globalement décroissantes avec la teneur en MAT de la ration. Les valeurs de la bibliographie sont très fréquemment inférieures aux nôtres. L'écart le plus important est observé pour le traitement 13.0% MAT de la ration. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les déficits d'azote fermentescible par rapport à l'énergie fermentescible sont proches pour nos trois traitements et exprimés par kg de MS. Ainsi, l'azote recyclé représente vraisemblablement une part du pool d'azote circulant dans l'organisme plus importante pour le régime 13.0% MAT, ce qui se traduit par une sécrétion d'azote dans le lait correspondant à une part de l'ingéré plus importante. Seules les valeurs de Kebreab *et al.* (2000) et Frank *et al.* (2002) conduisent à une valorisation dans le lait supérieure à celle de notre ration 14.5% MAT. Dans les essais de Franck *et al.* (2002), la réduction des apports d'AA digestibles dans l'intestin

Figure 21: Comparaison de la sécrétion dans le lait de l'azote ingéré (a) et de l'azote apparemment digéré (b) de l'expérimentation A avec les données de la bibliographie

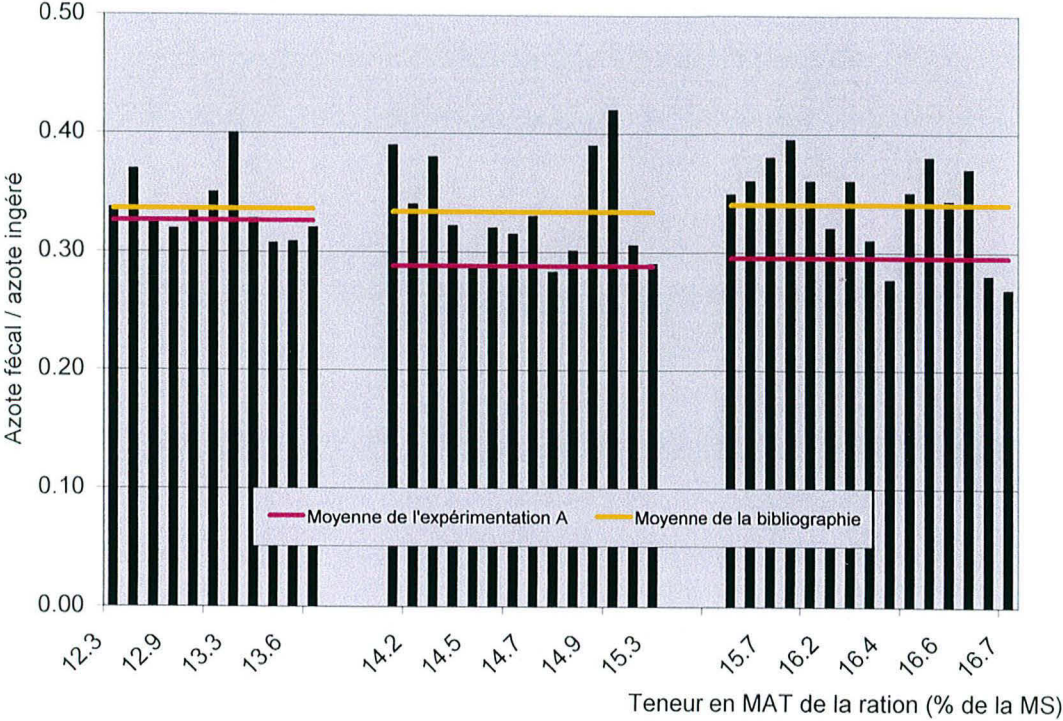


(par kg de lait standard) associée à des apports de concentrés compris entre 40 et 56% de la MS (selon le niveau de production) avec une ration composée de foin, herbe, orge, avoine, maïs grain et pulpes de betteraves engendre très probablement un déficit relatif d'azote fermentescible par rapport à l'énergie. Ainsi, les valeurs élevées obtenues par Frank *et al.* (2002) (0.37-0.41 contre 0.33 dans notre essai) seraient la conséquence d'une fourniture en énergie supérieure et/ou d'un déficit d'azote fermentescible par rapport à l'énergie plus important que pour notre expérimentation. La quantité d'azote sécrété dans le lait rapportée à l'azote digéré conduit le plus souvent à des valeurs supérieures aux données bibliographiques (Figure 21b). Les différences entre nos résultats et les données de la littérature diminuent lorsque le niveau de MAT augmente. Des rapports supérieurs sont enregistrés pour des rations particulièrement énergétiques (Van Vuuren *et al.*, 1993 ; Volden, 1999 ; Kebreab *et al.*, 2000), ce qui pourrait constituer un élément d'explication d'une utilisation plus efficace des apports azotés.

Dans notre essai, la part de l'azote excrété dans les fèces est diminuée quand la teneur en MAT de la ration augmente. Cette relation n'est pas rapportée dans la littérature car la digestibilité de l'azote des rations dépend grandement de la nature des sources protéiques utilisées et des pertes endogènes (azote microbien compris) qui constituent une part prépondérante (près de 80%) de l'azote fécal. Nos résultats indiquent que l'azote fécal correspond à des parts de l'azote ingéré inférieures aux moyennes de la bibliographie (Figure 22, Annexe 1). La différence entre nos données et la moyenne des données de la littérature augmente avec la teneur en MAT. Quelques auteurs ont obtenu des rapports entre l'azote excrété par les fèces et l'azote ingéré inférieurs aux nôtres. La diversité des sources azotées utilisées n'est pas un paramètre explicatif de ces différences. En effet, des rations à base de foin (Gonda *et al.*, 1995), d'ensilage d'herbe (Castillo *et al.*, 2001b) ou d'ensilage de maïs (Peyraud *et al.*, 1997a), ou d'un mélange d'ensilages (Dinn *et al.*, 1998 et Fisher *et al.*, 2000), mais aussi des rations avec des sources protéiques hautement fermentescibles (Gonda *et al.*, 1995 et Castillo *et al.*, 2001b) ou faiblement fermentescibles (Gonda *et al.*, 1995) conduisent à des niveaux d'azote ingéré excrété par voie fécale inférieurs.

Selon Thonney *et al.* (1979), les cendres insolubles dans l'HCl constituent un marqueur interne de bonne fiabilité avec un taux de recouvrement proche de 100%. Cependant Jurjanz *et al.* (2002) ont montré que l'utilisation de ce marqueur dans un contexte de prélèvements aléatoires (conditions similaires aux nôtres) peut conduire à une surestimation de la MS fécale

Figure 22: Comparaison de l'excrétion fécale d'azote rapportée à l'azote ingéré de l'expérimentation A avec les données de la bibliographie

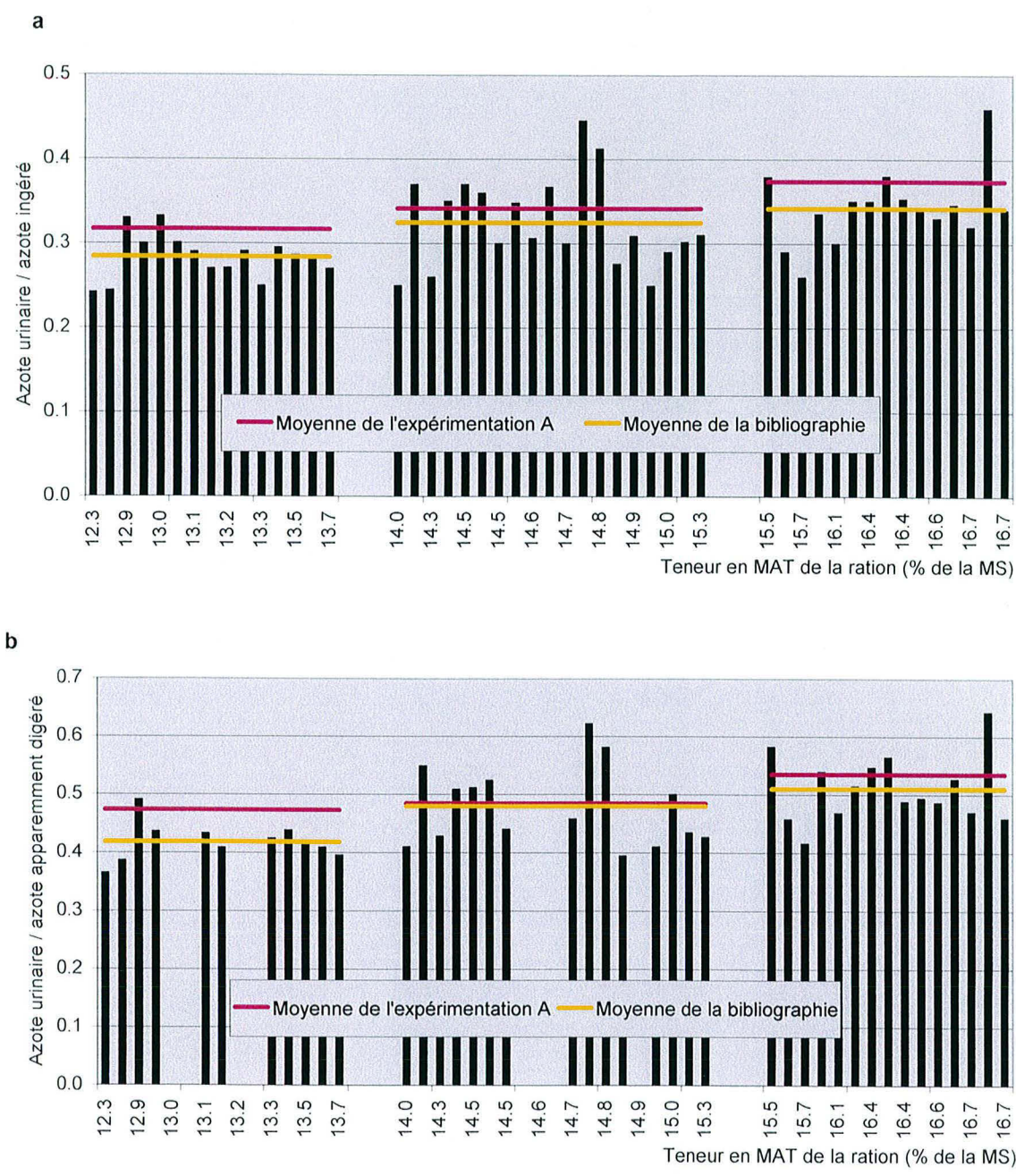


ce qui engendrerait une quantité et une part de l'azote ingéré excrétée par cette voie surestimées. Ainsi les valeurs déjà faibles observées dans notre essai pourraient être encore plus faibles. Pourtant, les sécrétions d'azote dans le lait, qu'elles soient exprimées en fonction de l'azote ingéré ou digéré, observées dans notre essai présentent les mêmes tendances en comparaison avec les données bibliographiques. Il en est de même pour l'excrétion urinaire d'azote exprimée par les deux méthodes. Ainsi, les résultats d'excrétion fécale d'azote peuvent être considérés tout à fait cohérents et comparables aux données de la littérature.

L'excrétion urinaire d'azote s'accroît avec le niveau de MAT confirmant la relation générale calculée à partir des données bibliographiques. Toutefois, l'azote urinaire représente une part de l'azote ingéré ainsi qu'une part de l'azote digéré, fréquemment plus élevées dans notre essai que ceux rencontrés dans la littérature, même avec des teneurs proches en MAT dans la ration (Figure 23, Annexe 1). De plus, nos quantités d'azote urinaire excrétées sont fréquemment supérieures à celles publiées. Les niveaux d'azote ingéré et d'azote digéré rapportés par les auteurs pourraient éventuellement expliquer ces rapports inférieurs. De fait, les niveaux d'ingestion référencés sont aussi bien inférieurs que supérieurs par rapport aux nôtres, particulièrement pour les niveaux les plus faibles en MAT. L'observation d'excrétions urinaires d'azote importantes dans notre essai suggère des apports d'énergie fermentescible insuffisants par rapport à l'azote fermentescible pour les trois traitements. Ceci conduirait à une absorption élevée d'ammoniac et par conséquent à une excrétion urinaire d'azote accrue. Ainsi, si les dégradations ruminales des trois rations apparaissent similaires, un déficit en énergie fermentescible pour les trois régimes est vraisemblable.

Les urémies enregistrées dans notre essai augmentent avec la teneur en MAT de la ration. Il en est de même pour les quantités d'urée excrétées dans le lait et dans l'urine. Un catabolisme hépatique accru d'AA afin de fournir de l'énergie supplémentaire pour l'organisme est envisageable, comme le suggèrent les taux de couverture des besoins énergétiques inférieurs à 100% pour les trois traitements. La nature de la source énergétique apportée dans la ration est susceptible de modifier la voie d'excrétion de l'azote. Ainsi, la quantité d'azote endogène excrété dans les fèces est augmentée lors d'une infusion de glucose au niveau de l'iléum terminal (Giráldez *et al.*, 1997). Cet effet est accompagné d'une diminution des pertes d'azote endogène dans l'urine sans que l'excrétion totale d'azote endogène ne soit affectée. Ainsi, il est envisageable de considérer que les écarts entre nos

Figure 23: Comparaison de l'excrétion d'azote dans l'urine de l'azote ingéré (a) et de l'azote apparemment digéré (b) de l'expérimentation A avec les données de la bibliographie



résultats et ceux de la littérature pour les excréctions urinaire et fécale soient un effet de la nature de l'énergie apportée par la ration. Globalement, les rations utilisées lors de notre expérimentation donnent lieu à une sécrétion d'azote dans le lait, rapportée à l'azote ingéré ou à l'azote digéré qui se situe parmi les plus élevées de la littérature. L'excrétion fécale d'azote représente des parts plutôt faibles de l'azote ingéré alors que l'azote excrété dans l'urine correspond à des proportions élevées. Les conditions d'un apport déficitaire en azote fermentescible par rapport à l'énergie fermentescible engendrerait une valorisation dans le lait plus élevée de l'azote ingéré et digéré sans toutefois diminuer les rejets d'azote dans l'urine.

La quantité d'azote recueillie dans le lait est augmentée de 3.6% pour le régime 14.5% MAT par rapport au régime 13.0% MAT (Tableau 31). Dans le même temps l'excrétion d'azote augmente de + 25.6% via l'urine et de + 1.6% via les fèces. Ainsi, le rendement marginal du supplément d'azote ingéré entre ces deux traitements est de 8.2% dans le lait et 49.2% dans l'urine. Pour l'azote apparemment digéré, ces rendements marginaux sont de 8.6% dans le lait et 51.7% dans l'urine. L'azote uréique contribue à 56.7% de l'augmentation de l'excrétion urinaire d'azote. Entre les traitements 14.5 et 16.0% MAT, la production d'azote est de + 10.5% dans le lait, + 25.8% dans l'urine et + 17.9% dans les fèces. Le rendement marginal du supplément d'azote ingéré correspond à + 22% dans le lait alors qu'il représente + 55.9% dans l'urine et + 32.3% dans les fèces. Le supplément d'azote sécrété dans le lait correspond à 32.6% du supplément d'azote digéré entre les traitements, et celui de l'azote urinaire représente 82.6%. L'augmentation de l'excrétion d'azote urinaire est due pour 100% à l'augmentation de la sécrétion d'urée. Ainsi, il semblerait qu'au-delà du seuil en MAT de 14.5%, l'excrétion d'azote sous forme d'urée dans l'urine est prépondérante sans doute en lien avec l'augmentation de l'urémie entre les traitements (+ 16.6% entre les rations 13.0 et 14.5% MAT et + 28.6% entre les rations 14.5 et 16.0% MAT). Les valeurs d'urémie croissantes peuvent être associées aux taux de couverture des besoins azotés croissants avec la teneur en MAT des rations, relation déjà rapportée par Roseler *et al.* (1993), Dhiman et Satter (1997) et Wright *et al.* (1998).

La notion de compromis entre l'azote rejeté dans l'environnement (urine + fèces) d'une part, l'azote valorisé sous forme de protéines dans le lait d'autre part, et la production de lait est développée. Le meilleur compromis est défini avec comme contexte la recherche d'un équilibre entre les excréctions d'azote et la valorisation d'azote dans le lait. Cet équilibre est

Tableau 31 : Evolutions des quantités d'azote ingéré, digéré et contenu dans les différents compartiments étudiés pour les trois traitements

	13.0% MAT	Δ	14.5% MAT	Δ	16.0% MAT
N ingéré	370	+ 61	431	+ 68	499
N digéré	250	+ 58	308	+ 46	354
N lait (g/j)					
N total	138	+ 5	143	+ 15	158
N protéique	131	+ 4	135	+ 14	149
N uréique	2.8	+ 0.7	3.5	+ 1.3	4.8
N urine (g/j)					
N total	117	+ 30	147	+ 38	185
N uréique	70	+ 17	87	+ 40	127
N fèces (g/j)	121	+ 2	123	+ 22	145
Urémie (g/L)	0.24	+ 0.04	0.28	+ 0.08	0.36

considéré intéressant dans la mesure où la production laitière reste sensiblement maintenue. L'azote rejeté dans l'urine et les fèces rapporté à l'azote des protéines du lait est croissant avec la teneur en MAT de la ration de 1.82 à 2.21 (Tableau 32). La production augmente également avec la teneur en MAT mais de manière non significative. Le traitement 14.5% MAT conduit à une excrétion d'azote dans l'urine plus les fèces 2 fois plus élevée que la sécrétion d'azote dans le lait pour une production de lait de 30.8 kg/j. Le traitement 13.0% MAT est plus intéressant en terme de valorisation de l'azote puisqu'il conduit à un rapport plus faible pour une production similaire. L'augmentation de la production entre les traitements 13.0 et 16.0% MAT est de + 6.5% alors que l'augmentation du rapport azote rejeté / azote sécrété est de + 21.4%. Ainsi, le traitement à 13.0% MAT présenterait le meilleur compromis entre la valorisation de l'azote et la production.

Tableau 32 : Compromis entre la valorisation de l’azote dans les protéines du lait, l’excrétion azotée et la production laitière

	13.0% MAT	14.5% MAT	16.0% MAT
N des protéines du lait (g/j)	131	135	149
N total excrété (urine + fèces) (g/j)	238	270	330
Production (kg/j)	30.7	30.8	32.7
	=> + 0.3% =>	=> + 6.2% =>	
N total excrété / N des protéines du lait	1.82	2.00	2.21
	=> + 9.9% =>	=> + 10.5% =>	

IV. Conclusion

Lorsque la teneur en MAT de la ration augmente, la quantité d'azote sécrété dans le lait est augmentée mais les quantités d'azote excrété dans les fèces et l'urine le sont également. La part de l'azote ingéré ou de l'azote digéré retrouvée dans le lait diminue lorsque la teneur en MAT augmente. Pour les trois traitements, les proportions d'azote recueilli dans le lait sont élevées par rapport aux données de la littérature obtenues avec une plage proche de teneurs en MAT dans la ration. Il est probable que nos conditions de déficit en azote fermentescible par rapport à l'énergie fermentescible conduise à une valorisation plus élevée de l'azote dans le lait sans pour autant engendrer de diminution des excréments fécale et urinaire.

La ration 13.0% MAT conduit au rapport le plus bas entre l'azote rejeté dans l'environnement (fèces + urine) et l'azote valorisé sous forme de protéines dans le lait sans que la production ne diminue de façon significative. De plus, les augmentations de production qui accompagnent les augmentations de teneur en MAT sont de plus faibles amplitudes que celles observées pour le rapport azote rejeté / azote valorisé. Dans ces conditions, la ration à 13.0% MAT présenterait le meilleur compromis entre la production, la sécrétion d'azote dans le lait et les excréments azotés dans les fèces et l'urine.

A l'issue de cette expérimentation, au moins deux approches complémentaires peuvent être envisagées pour approfondir les facteurs de variations de la distribution de l'azote :

- 1) Cette réponse, obtenue sur des animaux en milieu de lactation se retrouve-t-elle à différentes périodes de la lactation ?
- 2) Le niveau d'apport en énergie de la ration peut-il permettre de moduler cette réponse obtenue vraisemblablement avec des apports énergétiques limitant ?

De façon à répondre à ces questions deux essais complémentaires ont été mis en place pour tester l'effet du stade de lactation sur la sécrétion d'azote dans le lait en interaction avec le niveau de MAT de la ration et étudier l'interaction des niveaux azoté et énergétique de la ration sur la distribution de l'azote.

Expérimentation B

« Effet du stade de lactation sur la sécrétion d'azote dans le lait en interaction avec le niveau de MAT de la ration »

I. Objectifs

Dans l'essai précédent les quantités d'azote produit dans le lait correspondent à des parts de l'azote ingéré ou apparemment digéré, élevées par rapport aux valeurs de la littérature. Le déficit imposé entre les apports en azote fermentescible et en énergie fermentescible est sans doute à la base de l'utilisation élevée de l'azote de la ration. Par ailleurs, la ration la moins concentrée en MAT (13%) assurait le meilleur compromis entre la valorisation d'azote dans le lait sous forme de protéines, l'excrétion d'azote (urine + fèces) et la production laitière dans un contexte de considération de l'azote rejeté dans l'environnement sans pénaliser la production.

En complément à ces résultats nous souhaitons étudier l'effet du stade de lactation sur l'exportation d'azote dans le lait en interaction avec la teneur en MAT de la ration. L'hypothèse de travail est que l'efficacité d'utilisation des apports azotés pour la synthèse des protéines du lait peut être améliorée lors du pic de lactation soit lorsque l'intensité de fonctionnement du métabolisme est maximale. Deux niveaux de MAT sont utilisés soit 13% MAT similaire à l'expérimentation A, soit 14% MAT. Le faible écart entre les traitements est volontaire car, pour des teneurs supérieures, la sécrétion d'azote dans les protéines du lait est moins efficace comme le montre l'évolution du rapport entre les rejets azotés et la sécrétion d'azote dans les protéines du lait

Les rations ont des niveaux d'apports énergétiques similaires et proches de ceux de l'expérimentation A. Les apports en azote fermentescible sont déficitaires par rapport à l'énergie fermentescible (PDIE - PDIN de l'ordre de 10g/kg MS). Les constituants de la ration sont semblables pour les deux traitements, seules les proportions diffèrent. L'étude porte sur les semaines 3 à 18 de lactation soit la période durant laquelle on observe les plus grandes variations métaboliques. L'effectif utilisé comprend un tiers de vaches primipares de façon à représenter la composition moyenne d'un troupeau.

II. Résultats

II.1. Production et composition du lait

II.1.1. Production

Comme attendu, le niveau de production de lait évolue avec le stade de lactation ($P < 0.01$, Figure 24). Des maxima de production (lait brut et lait standardisé à 4% de matière grasse) sont observés entre les semaines 7 et 9 de lactation pour les deux traitements. A partir de la 6^{ème} semaine de lactation, une tendance à une production de lait brut plus élevée pour le traitement 14% MAT est observée. Toutefois, cette différence n'est pas significative en moyenne (30.6 contre 31.2 kg/j).

En moyenne la production de lait standard tend à être supérieure pour le traitement 14% MAT (31.8 contre 30.0 kg/j). Cependant, en raison de l'importante variabilité entre les individus ($ETR = 4.2$ kg/j) les écarts entre lots ne sont pas significatifs.

II.1.2. Composition du lait (Taux, Quantité de matière)

Le taux protéique du lait est significativement ($P < 0.01$) affecté par le stade de lactation : diminution entre les semaines 3 et 5 de lactation pour augmenter au-delà (Figure 25). La quantité de matière protéique produite augmente jusqu'en semaine 9 où elle semble atteindre un plateau, l'effet du stade de lactation est significatif ($P < 0.01$). Le TP ne diffère pas significativement entre les traitements, ni la matière protéique (30.4 contre 30.1 g/L et 926 contre 954 g/j) bien que les quantités produites par le lot 14% MAT soient le plus souvent plus fortes.

Les taux butyreux sont très variables au cours de l'essai (Figure 26), ils tendent à diminuer sans effet significatif du stade de lactation du fait des fortes variations. En moyenne, le TB tend à être plus élevé pour le traitement 14% MAT (39.6 contre 38.3 g/kg), la différence n'étant pas significative. Le stade de lactation n'a pas d'influence significative sur la quantité de matière grasse produite, mais les valeurs sont significativement plus élevées pour le traitement 14% MAT (1268 contre 1182 g/j, $P < 0.01$).

Pour l'ensemble de ces variables, il n'y a pas d'interaction significative entre le stade de lactation et le niveau de MAT de la ration.

Figure 24: Variations de la production de lait brut et de lait à 4% de matière grasse

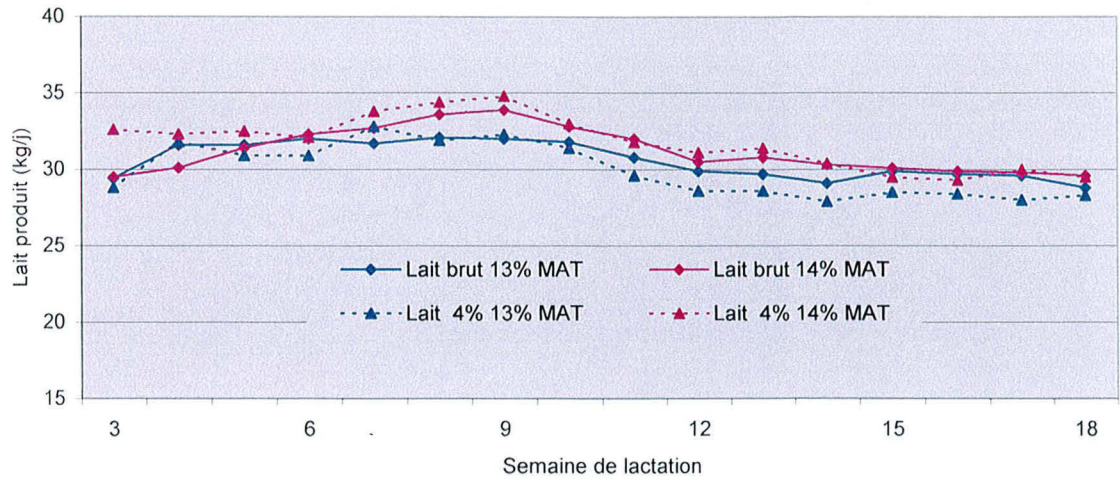


Figure 25: Variations du taux protéique du lait et de la quantité de matière protéique produite

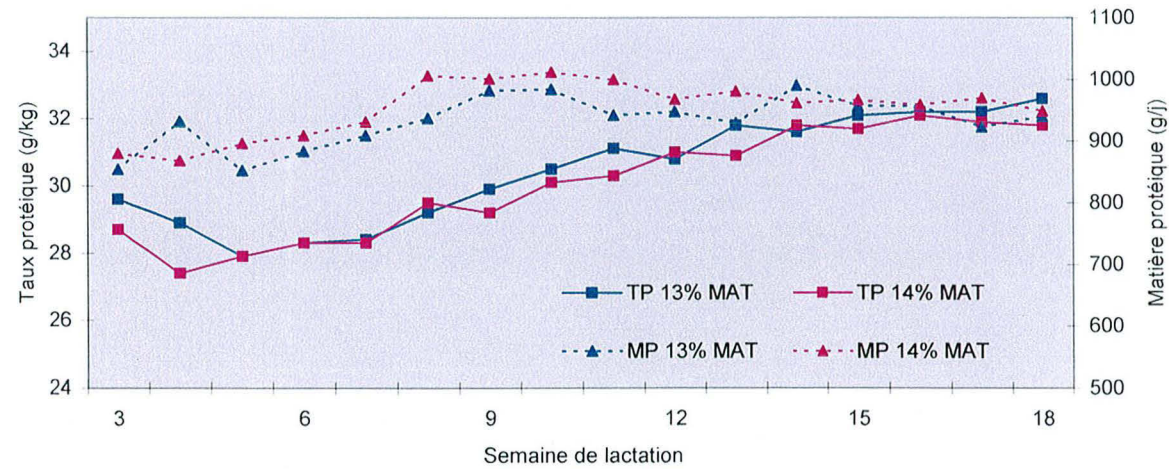
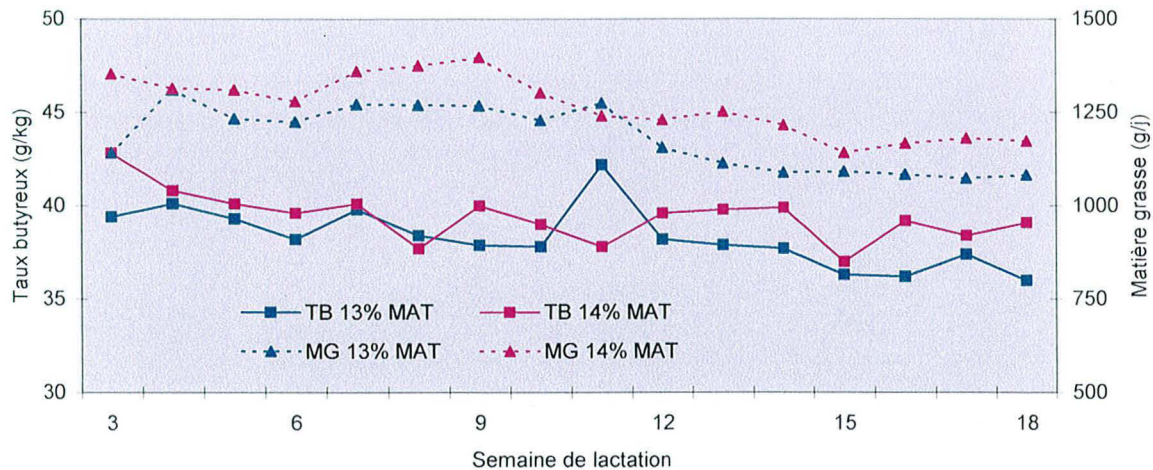


Figure 26: Variations du taux butyreux du lait et de la quantité de matière grasse produite



II.1.3. Composition azotée

Les teneurs en azote total et en azote protéique du lait sont assez stables ou légèrement décroissantes entre les semaines 3 et 6 puis elles sont croissantes à partir de la semaine 9 (Tableau 33). Ainsi, l'effet du stade de lactation sur ces variables est significatif ($P < 0.01$). Les teneurs en ANP du lait sont relativement constantes au cours de l'essai, le stade de lactation n'a pas d'effet significatif. La teneur en urée du lait ne suit pas de tendance particulière : les valeurs sont à peu près stables pour le traitement 13% MAT alors qu'elles sont plutôt croissantes pour le traitement 14% MAT.

Le niveau azoté de la ration n'a pas d'effet (NS) sur les teneurs du lait en azote total (en moyenne de 5.15 et 5.12 g N/L pour les traitements 13% MAT et 14% MAT respectivement), et en azote protéique (en moyenne de 4.90 et 4.84 g N protéique/L) (Tableau 33). En revanche, les teneurs en ANP et en urée ($P < 0.01$) sont significativement supérieures pour le traitement 14% MAT.

Les interactions entre le stade de lactation et le traitement ne sont pas significatives pour ces variables.

Les quantités d'azote total exportées dans le lait sont proches de 160 g/j en moyenne. Ce paramètre est influencé par le stade de lactation ($P < 0.05$, Tableau 34) avec une augmentation jusqu'en semaines 9 et 12 puis une légère diminution au-delà. Cette évolution est indépendante du niveau azoté de la ration. Il en est de même pour la quantité d'azote protéique du lait (effet stade : $P < 0.05$) qui est comprise entre 140 et 157 g/j quel que soit le traitement. Les quantités d'azote non protéique et d'azote de l'urée produites dans le lait augmentent jusqu'en semaine de lactation 9 puis deviennent relativement stables ($P < 0.01$). Le traitement 14% MAT conduit à des productions d'ANP et d'urée dans le lait en moyenne plus élevées ($P < 0.05$). Pour ces deux paramètres et pour tous les points de la cinétique, les valeurs observées pour le traitement 14% MAT sont systématiquement plus élevées que celles du traitement 13% MAT.

Il n'y a pas d'interaction significative entre le stade de lactation et le niveau de MAT de la ration pour ces variables.

**Tableau 33 : Composition azotée du lait en fonction du stade de lactation
et du niveau de MAT de la ration**

Composés azotés		N total g/L		N protéique g/L		ANP mg/L		N uréique mg/L	
Traitement (% MAT)		13	14	13	14	13	14	13	14
Semaine de lactation									
	3	5.06	4.90	4.82	4.63	248	267	154	191
	6	4.77	4.89	4.51	4.62	255	271	209	255
	9	4.99	4.88	4.74	4.60	256	275	201	257
	12	5.20	5.28	4.95	5.01	252	268	207	247
	15	5.39	5.36	5.13	5.07	258	284	206	279
	18	5.50	5.41	5.24	5.12	258	293	197	282
	Moyenne	5.15	5.12	4.90	4.84	254 b	276 a	196 b	252 a
Effet	Traitement	NS		NS		<0.01		<0.01	
	Stade	<0.01		<0.01		NS		<0.01	
	Trait. x stade	NS		NS		NS		NS	
	ETR	0.45		0.44		21		52	

NS : Non Significatif
ETR : Ecart-Type résiduel
a, b : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0,05)

**Tableau 34 : Quantité journalière d'azote exporté dans le lait en fonction du stade de lactation et du
niveau de MAT de la ration**

Composés azotés		N total g/j		N protéique g/j		ANP g/j		N Uréique g/j	
Traitement (% MAT)		13	14	13	14	13	14	13	14
Semaine de lactation									
	3	149	148	142	140	7.3	8.1	2.2	2.7
	6	149	151	141	142	8.1	8.5	3.2	3.8
	9	164	163	156	154	8.5	9.5	3.2	4.2
	12	161	166	153	157	7.8	8.5	3.0	3.7
	15	162	162	154	154	7.8	8.7	3.0	4.1
	18	158	160	150	151	7.1	8.8	2.4	4.0
	Moyenne	157	158	149	150	7.8 b	8.7 a	2.8 b	3.7 a
Effet	Trait.	NS		NS		<0.05		<0.01	
	Stade	<0.05		<0.05		<0.01		<0.01	
	Trait. x Stade	NS		NS		NS		NS	
	ETR	27		26		1.4		0.9	

NS : Non Significatif
ETR : Ecart-Type résiduel
a, b : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0,05)

II.2. Excrétion fécale

L'excrétion fécale d'azote augmente au cours des semaines 3 à 18 de lactation de 100 à 149 g/j pour le traitement 13% MAT, et de 118 à 179 g/j pour le traitement 14% MAT ($P<0.01$, Tableau 35). De plus, elle est significativement plus élevée pour le traitement le plus riche en azote ($P<0.01$), sans qu'il y ait d'interaction entre le stade et le niveau de MAT de la ration.

Tableau 35 : Evolution de l'excrétion fécale d'azote en fonction du stade de lactation et du niveau de MAT (g/j)

Traitement (% MAT)	Stade de lactation (en semaines)							Effets		
	3	6	9	12	15	18	Moyenne	Stade	Trait	Stade x trait
13	100	120	137	140	134	149	130 b	<0.01	<0.01	NS
14	118	133	160	173	179	179	157 a			

NS : Non Significatif

ETR : Ecart-Type résiduel

a, b : Lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes ($P<0,05$)

II.3. Ingestion et digestibilité apparente de l'azote

L'ingestion de MS augmente tout au long de l'essai pour les deux traitements (de 16.3 à 22.0 kg/j) ($P<0.01$, Figure 27). L'ingestion de MS par les vaches du lot à 14% MAT tend à être plus élevée (19.9 contre 19.1 kg/j en moyenne, $P<0.10$). Les ingestions d'azote, de PDIN, de PDIE et d'énergie évoluent dans le même sens que celui de la MS au cours de la période étudiée ($P<0.01$). L'ingestion d'énergie tend à être plus importante pour le traitement 14% MAT ($P<0.10$) alors que les ingestions d'azote, de PDIN et de PDIE sont significativement plus élevées pour ce traitement ($P<0.01$).

La digestibilité apparente de l'azote varie de manière significative avec le stade de lactation ($P<0.01$, Figure 28). Elle est plus élevée en début de lactation : en semaine 3 pour le traitement 13% MAT (71.2%) et en semaine 6 pour le traitement 14% MAT (68.6%). Au-delà, les valeurs diminuent jusqu'à la semaine 12. Avec le niveau de MAT dans la ration le plus fort, les valeurs de digestibilité apparente tendent à être plus faibles ($P<0.10$). Cette tendance apparaît surtout au-delà de la semaine 9.

Les quantités d'azote apparemment digéré sont affectées par le stade de lactation ($P<0.01$, Figure 28) sans qu'une tendance générale apparaisse. Elles sont plus élevées ($P<0.01$) pour le

Figure 27: Variations des ingestions de matière sèche, d'azote, de PDI et d'énergie

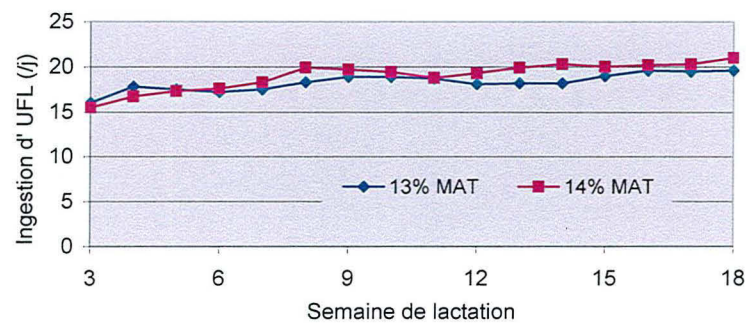
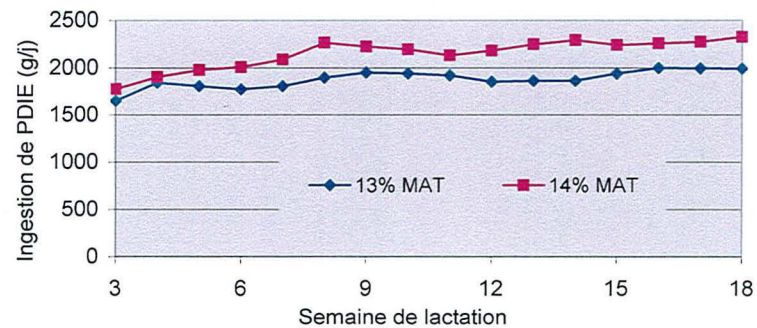
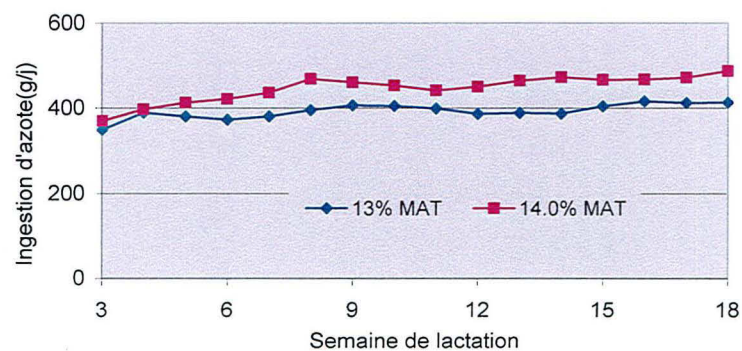
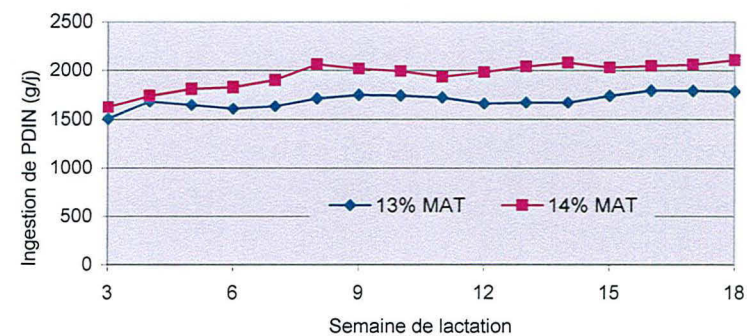
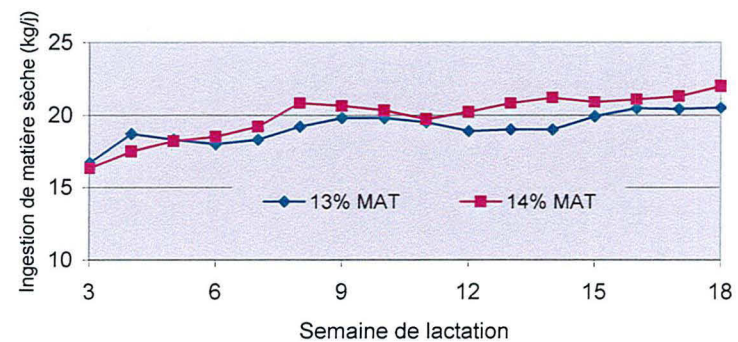
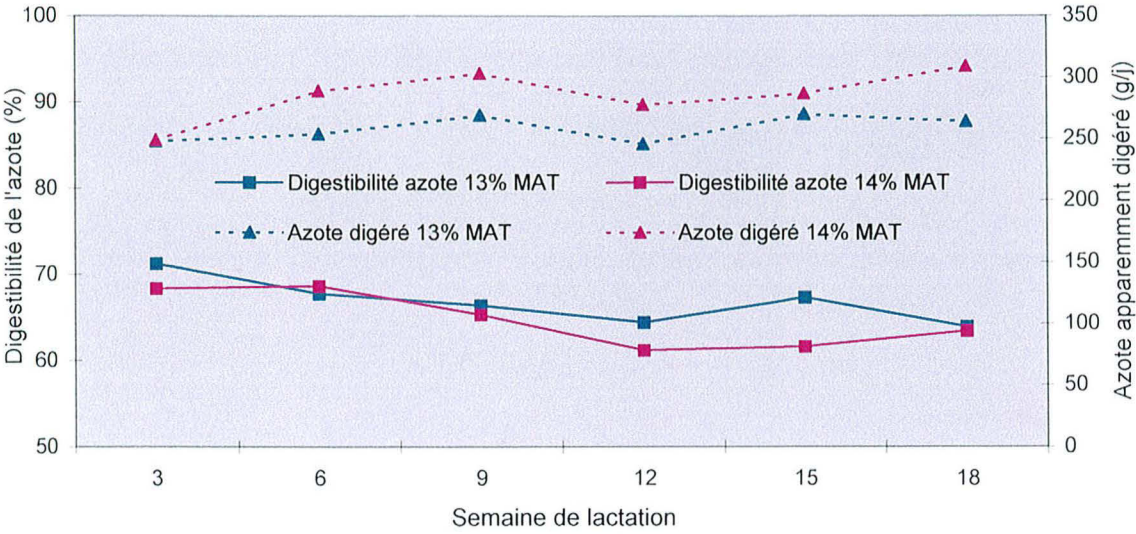


Figure 28: Variations de la digestibilité apparente de l'azote et de la quantité d'azote digéré



traitement 14% MAT (286 g/j en moyenne) que pour le traitement 13% MAT (259 g/j) pour l'ensemble des mesures.

Il n'y a pas d'interaction significative entre le stade de lactation et le niveau de MAT de la ration pour l'ensemble de ces variables.

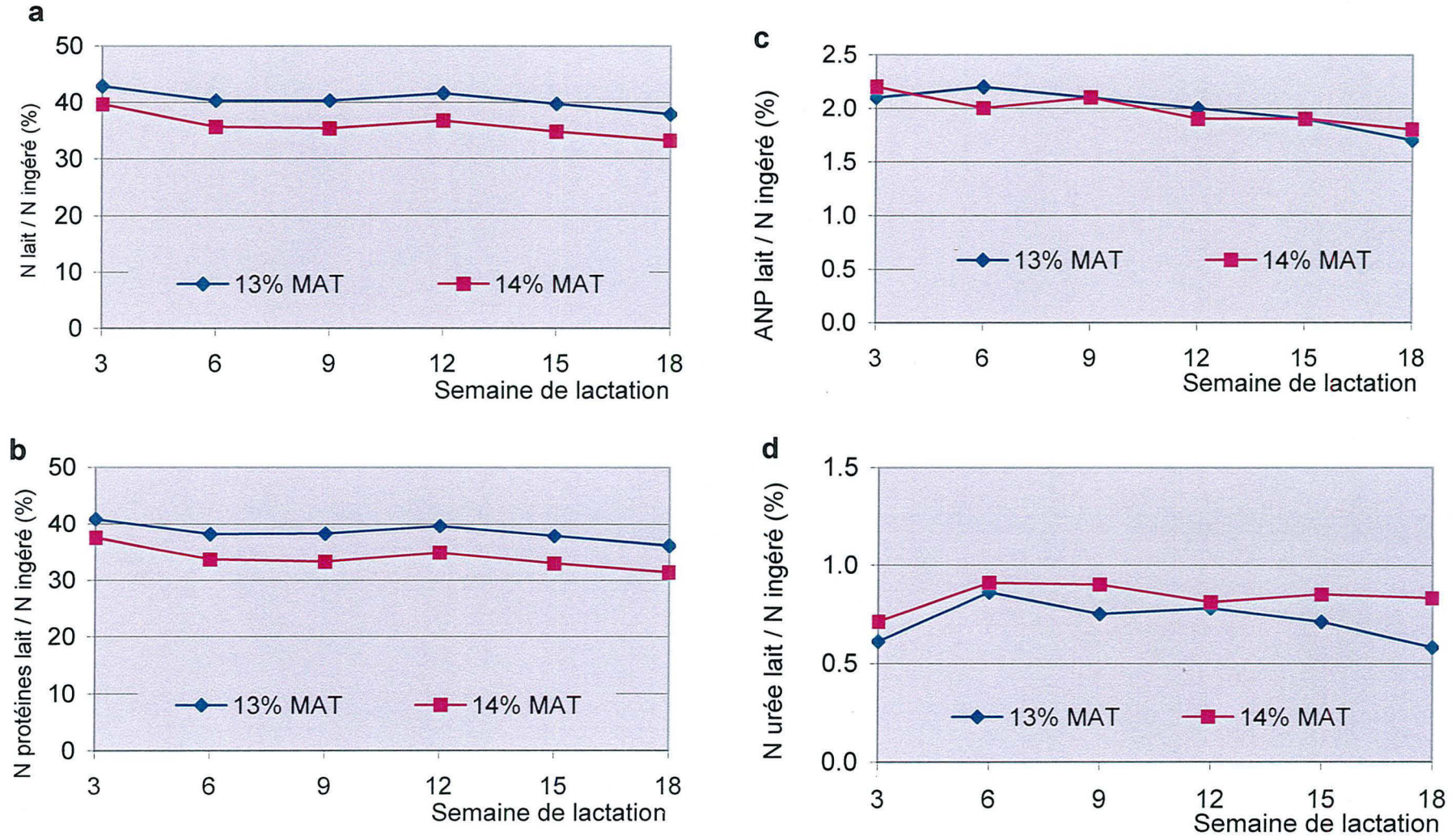
II.4. Efficacité de l'exportation dans le lait de l'azote ingéré

Un effet significatif ($P < 0.01$) du stade de lactation est enregistré pour l'ensemble des variables relatives à la fixation dans le lait de l'azote ingéré (Figure 29). La part de l'azote ingéré recueillie dans le lait (azote total) est la plus importante lors de la semaine 3 avec 42.9% pour le traitement 13% MAT et 39.6% pour le traitement 14% MAT (Figure 29a). Les valeurs minimales sont observées pour les deux traitements en semaine 18 avec 37.8% et 33.1% de l'azote ingéré sécrété dans le lait. De manière similaire, la part de l'azote ingéré sécrété sous forme de protéines dans le lait est plus élevée en semaine 3 : 40.8% et 37.5% pour les traitements 13% et 14% MAT respectivement (Figure 29b). Les valeurs minimales sont encore observées en semaine 18 pour les deux traitements avec 36.1% et 31.3%. La part de l'azote ingéré sécrétée dans le lait sous forme d'ANP est également supérieure en début de lactation : 2.2% pour le traitement 13% MAT en semaine 6 et pour le traitement 14% MAT en semaine 3 (Figure 29c). L'excrétion sous forme d'azote uréique semble atteindre un maximum vers la 6^{ème} semaine de lactation (0.9% de l'azote ingéré pour les deux traitements, Figure 29d) et évolue peu par la suite.

L'azote total produit dans le lait représente une part de l'azote ingéré plus élevée ($P < 0.01$) pour le traitement 13% MAT avec une valeur moyenne de 40.4% contre 35.8% pour le traitement 14% MAT. Il en est de même pour la part de l'azote ingéré sécrétée sous forme de protéines (38.4% contre 33.9%, $P < 0.01$). L'ANP du lait correspond à 1.7 et 2.2% de l'ingéré sans différence entre les traitements (NS). A l'inverse des autres formes azotées, la part de l'azote uréique est plus importante pour le traitement apportant le plus de MAT (0.83% contre 0.71%, $P < 0.01$).

Il n'y a pas d'interaction significative entre le traitement et le stade de lactation pour l'ensemble des paramètres de l'exportation dans le lait de l'azote ingéré.

Figure 29: Efficacité de l'exportation dans le lait de l'azote ingéré



II.5 Efficacité de la sécrétion dans le lait de l'azote digéré

La sécrétion dans le lait de l'azote digéré ne suit pas d'évolution particulière pour l'azote total et l'azote protéique en dépit d'un effet significatif du stade de lactation ($P < 0.05$, Figure 30). La part d'azote digéré sécrétée dans le lait atteint son maximum en semaine 12 avec 65.1% et 60.4% pour les traitements 13% et 14% MAT respectivement (Figure 30a). La valorisation sous forme d'azote protéique de l'azote digéré est également maximale en semaine 12 avec des valeurs 62.0% et 57.3% pour les traitements 13% et 14% MAT respectivement (Figure 30b). L'ANP du lait rapporté à l'azote digéré est relativement stable au cours de la période étudiée (NS). La part d'azote uréique tend à augmenter jusqu'en semaine 9 ; l'effet du stade de lactation sur cette variable est significatif ($P < 0.05$).

Le traitement 14% MAT conduit à une part moyenne de l'azote digéré fixé dans le lait plus faible (55.6% contre 61.1%, $P < 0.01$). L'azote protéique rapporté à l'azote digéré est également plus faible en moyenne pour le niveau 14% MAT ($P < 0.01$) avec 52.6% contre 58.1%. Le rapport ANP du lait / azote digéré est similaire pour les deux traitements (3.0% en moyenne). En revanche, l'azote uréique du lait correspond à des parts de 1.1 à 1.3% de l'azote digéré, avec une valeur moyenne plus élevée ($P < 0.01$) pour le traitement 14% MAT.

Il n'y a pas d'interaction significative entre le traitement et le stade de lactation pour l'ensemble de ces paramètres.

II.6. Paramètres sanguins

Le stade de lactation a un effet significatif sur l'urémie qui augmente légèrement, surtout pour le régime 14% MAT ($P < 0.01$, Figure 31) alors que la teneur en AGNE diminue globalement et principalement pour le régime 14% MAT ($P < 0.01$).

L'urémie est significativement ($P < 0.01$) plus élevée avec le traitement 14% MAT (0.25 contre 0.18 g/L en moyenne). Les teneurs en AGNE du plasma ne sont pas significativement affectées par la teneur en MAT de la ration.

Il n'y a pas d'interaction significative entre le stade de lactation et le niveau de MAT de la ration sur ces paramètres.

II.7. Poids vif

Le stade de lactation a un effet significatif ($P < 0.01$) sur le poids vif qui augmente légèrement à partir de la 6^{ème} semaine de lactation (Figure 32). Les poids vifs des animaux sont similaires pour les deux traitements. L'interaction entre le traitement et le stade n'est pas significative.

Figure 30: Efficacité de l'exportation dans le lait de l'azote digéré

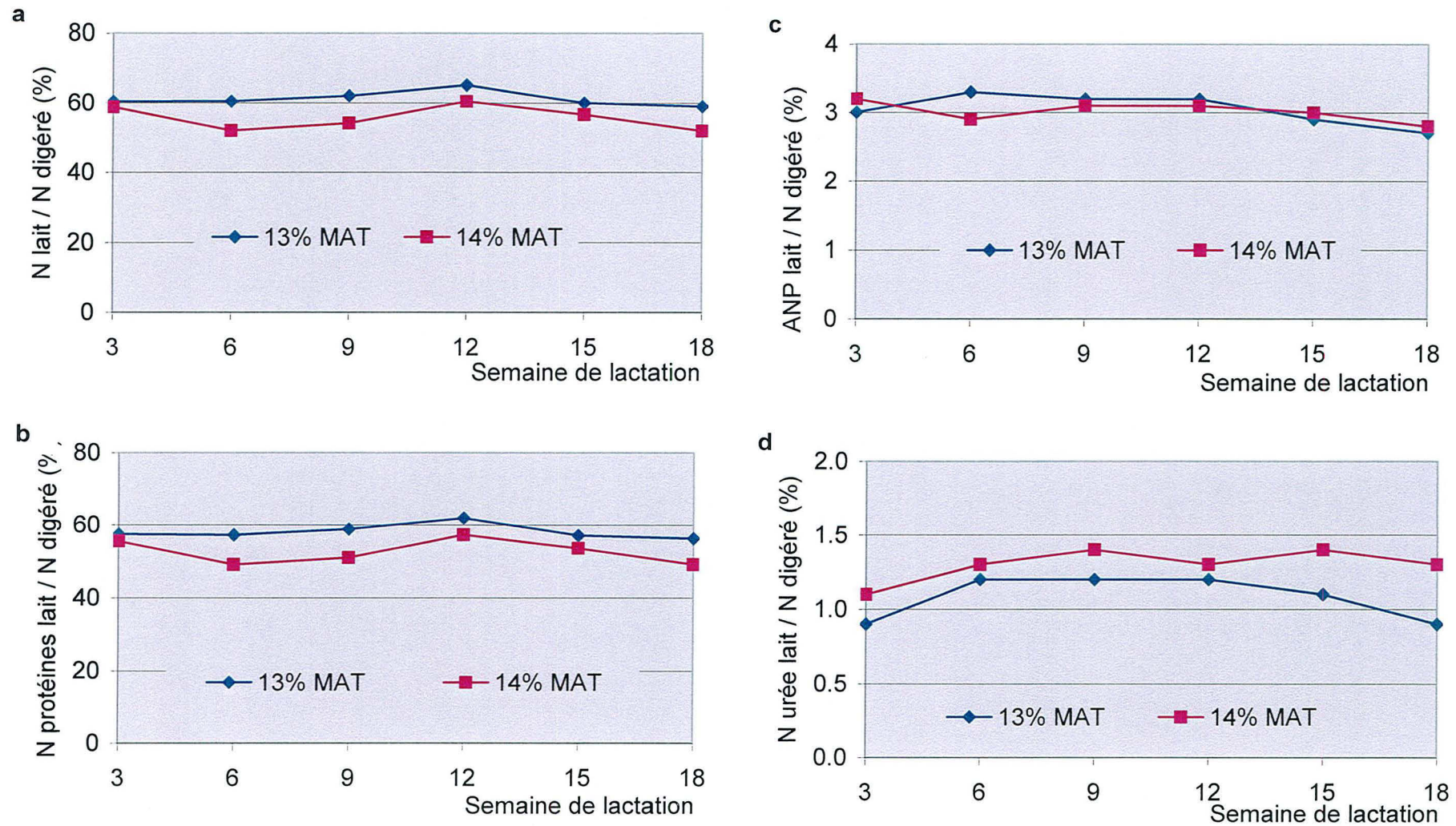


Figure 31: Variations des teneurs en urée (a) et en AGNE (b) du plasma

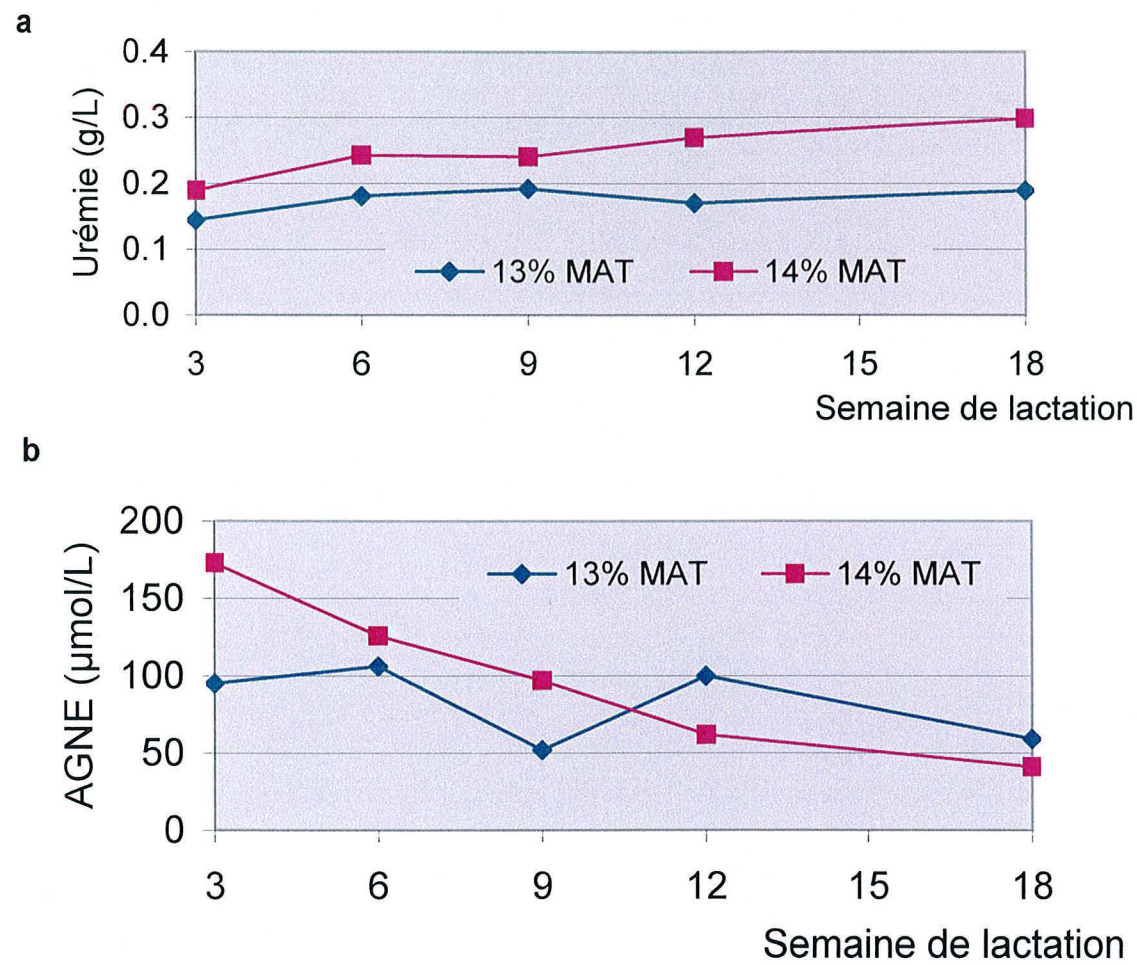
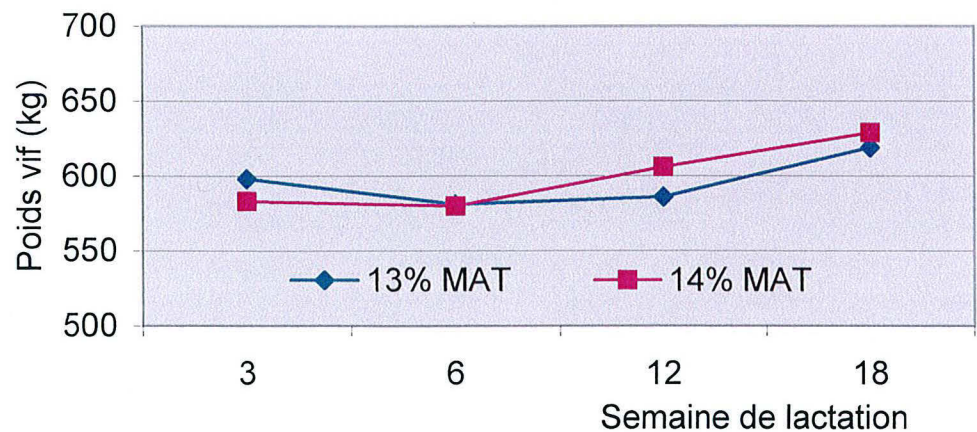


Figure 32: Evolution du poids vif des vaches



Les variations de poids des animaux sont similaires entre les traitements pour chaque intervalle de pesée ainsi que pour la moyenne de l'essai (Tableau 36). La forte variabilité individuelle ne permet pas d'atteindre le seuil de signification malgré des écarts de GMQ importants (jusqu'à 230 g/j entre les semaines 6 et 12).

Tableau 36 : Variations du gain moyen quotidien des vaches au cours de l'essai en fonction du niveau de MAT de la ration (g/j)

Traitement (% MAT)	Intervalle (en semaines)			
	2 à 6	6 à 12	12 à 19	2 à 19
13	-144	420	616	345
14	-163	650	504	397
Effet traitement	NS	NS	NS	NS
ETR	609	504	241	208

NS : Non Significatif

ETR : Ecart-Type résiduel

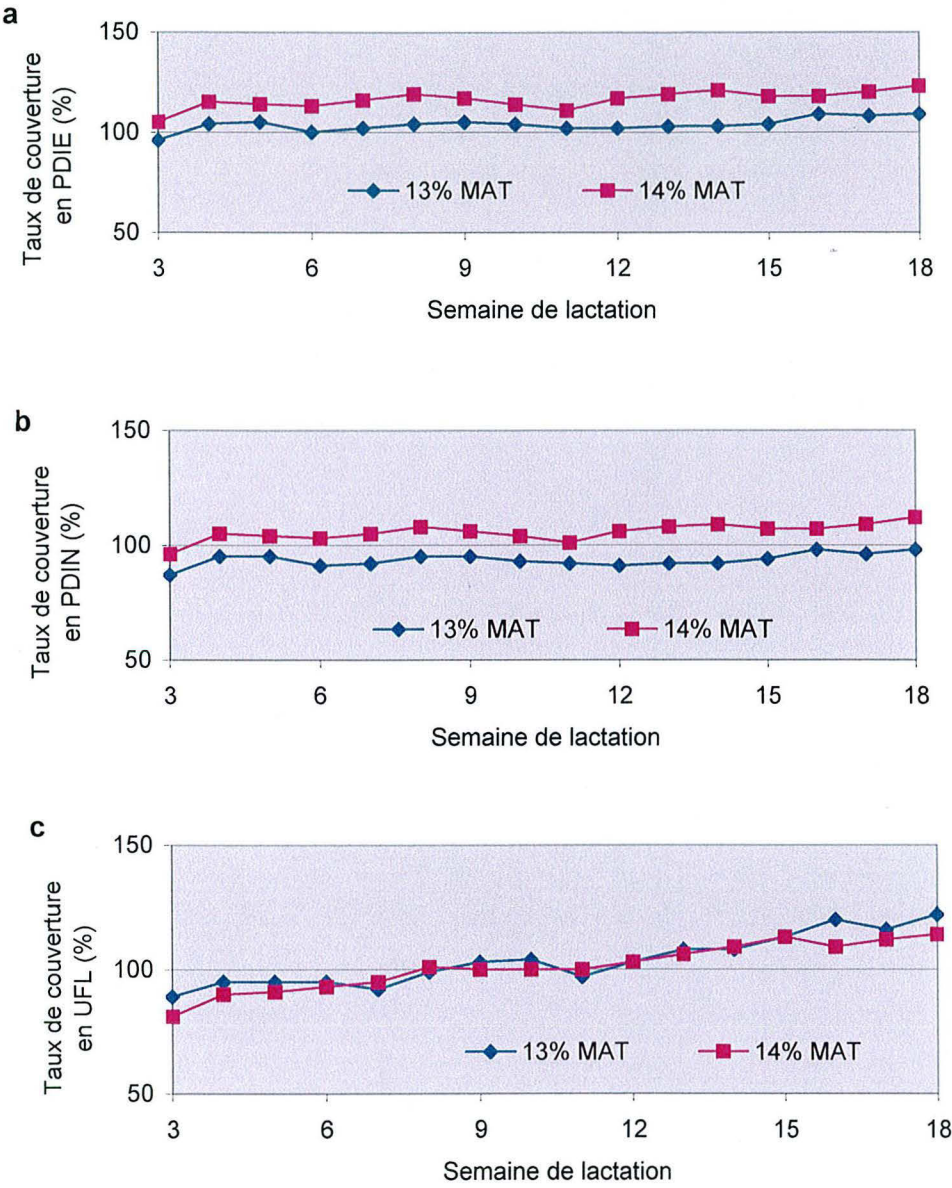
II.8. Taux de couverture

Les niveaux de couverture des besoins en azote (PDIE et PDIN) évoluent significativement pendant la période de l'essai ($P < 0.01$). Ils augmentent entre les semaines 3 et 4 puis sont relativement stables (Figure 33a et b). Ils sont supérieurs pour le traitement 14% MAT : 116% contre 104% pour la couverture des besoins en PDIE, et 105 contre 94% en moyenne pour la couverture des besoins en PDIN ($P < 0.01$).

Les taux de couverture des besoins énergétiques évoluent de manière significative avec le stade physiologique des vaches de 85% en semaine 3 à 118% en semaine 18 en moyenne pour les deux traitements ($P < 0.01$, Figure 33c). Ils sont similaires pour les deux traitements (NS).

Les interactions entre le traitement et le stade de lactation ne sont pas significatives pour ces paramètres.

Figure 33: Variations des taux de couverture des besoins en PDIE (a), en PDIN (b) et en énergie (c)



III. Discussion

Les ingestions de MS, les productions de lait, les taux (TP et TB) et les quantités de matière produite (matière protéique et matière grasse) évoluent de façon classique en fonction du stade de lactation. La distribution de l'alimentation sous forme de ration complète engendre toutefois, pour ces variables, des évolutions moins marquées que celles enregistrées avec des rations classiques. Les quantités d'azote total ou d'azote protéique recueillies dans le lait représentent des parts de l'azote ingéré ou digéré qui évoluent significativement avec le stade de lactation. En absence d'une évolution marquée au cours de la période de l'essai, (Figures 29 et 30), il semblerait bien que l'effet du stade ne soit pas direct sur ces paramètres. Les variations simultanées des différentes variables ingestion, digestibilité de l'azote, production de lait, teneur en azote du lait sont difficilement compatibles avec la mise en évidence d'un effet bien différencié du stade de lactation. Les données individuelles concernant la sécrétion d'azote dans les protéines du lait rapportée à l'azote digéré exprimées en fonction de la quantité d'azote digéré indiquent une forte variabilité entre les individus aussi bien pour un stade de lactation fixe que pour une quantité donnée d'azote apparemment digéré (Figure 34). Ainsi, le stade de lactation n'est pas, dans nos conditions, un facteur de variation important de l'efficacité de l'exportation de l'azote (ingéré ou digéré) dans le lait. La comparaison avec les données de la bibliographie est difficile car les plages de variations du stade de lactation et du niveau de MAT de la ration sont faibles (Tableau 37). A partir des données de Gonda *et al.* (1995) et Berry *et al.* (2001), une diminution de la part d'azote ingéré ou digéré recueillie dans le lait avec le stade de lactation est observée. Les résultats de Susmel *et al.* (1995) conduisent également à une diminution de ces valeurs entre les semaines 3 et 7 de lactation sans que cette diminution ne persiste au-delà. Ainsi, nos résultats sont plutôt contraires à la tendance qui ressort de la littérature, mais cette tendance est basée sur peu de références et dont sa signification réelle n'est pas démontrée.

L'exportation vers le lait de l'azote ingéré ou de l'azote apparemment digéré est plus efficace pour le traitement 13% MAT (40.4 contre 35.8% de l'azote ingéré, $P < 0.01$, et 61.1 contre 55.6% de l'azote apparemment digéré, $P < 0.05$). L'urémie est plus faible pour ce régime (0.175 contre 0.248 g/L, $P < 0.01$) et les taux de couverture des besoins en PDIN et PDIE également (94 contre 105% pour les PDIN, $P < 0.01$, et 104 contre 116% pour les PDIE, $P < 0.01$). Le pool azoté circulant dans l'organisme serait alors croissant avec la teneur en MAT de la ration. L'efficacité d'utilisation de l'azote circulant par la mamelle serait fonction de ce pool, et ce d'autant plus que les besoins énergétiques sont couverts de manière similaire

Figure 34: Evolution de l'exportation de l'azote digéré dans les protéines du lait en fonction du stade de lactation et de la quantité d'azote digéré (données individuelles)

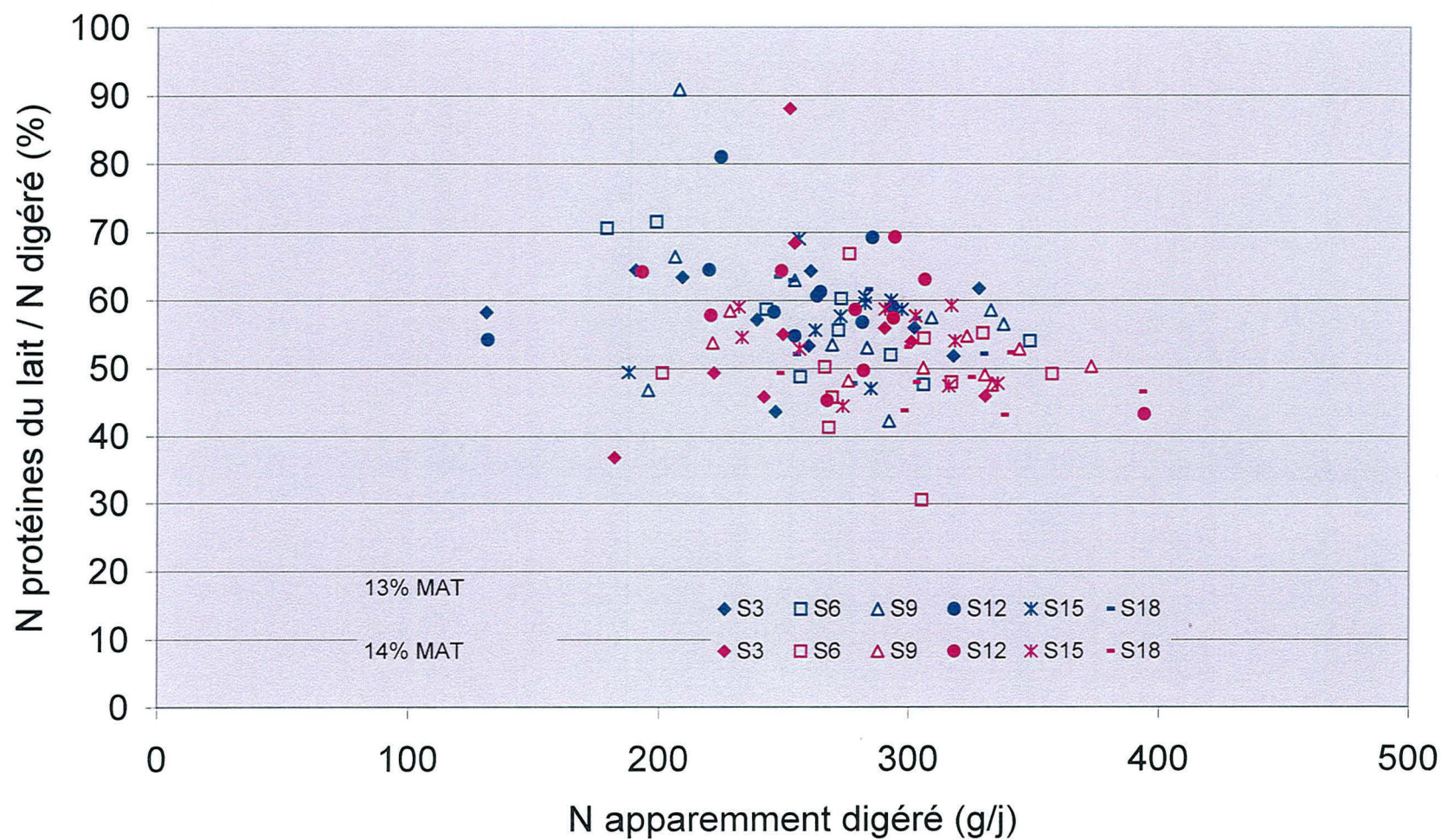


Tableau 37: Données bibliographiques concernant la distribution de l'azote dans le lait en fonction du stade de lactation

Références	Stade de lactation en semaine	Ration Teneur en MAT / Composition	MS ingérée kg/j	N ingéré g/j	N digéré g/j	Lait kg/j	N lait g/j	N lait/ N ingéré	Nlait/ N digéré
Expérimentation B	3	12,9	16,7	349	248	29,4	146	0,429	0,603
	6		18,0	373	254	32,0	149	0,403	0,604
	9		19,8	406	269	32,0	164	0,403	0,620
	12		18,9	386	246	29,9	155	0,416	0,651
	15		19,9	404	270	29,9	159	0,397	0,600
	18		20,5	413	264	28,8	156	0,378	0,589
	3	14,0	16,3	370	249	29,5	152	0,396	0,587
	6		18,5	422	289	32,3	154	0,356	0,520
	9		20,6	461	303	33,9	159	0,353	0,541
	12		20,2	451	278	30,5	168	0,367	0,604
	15		20,9	467	287	30,1	162	0,347	0,566
	18		22,0	488	309	29,6	160	0,331	0,519
Susmel <i>et al.</i> 1995	3	11,1	13,0	231	132	22,3	88	0,381	0,667
	7	11,2	14,3	256	152	20,2	82	0,320	0,539
	10	10,8	15,1	261	149	18,1	82	0,314	0,550
	14	11,0	15,1	265	146	16,6	81	0,306	0,555
Gonda <i>et al.</i> 1995	15	13,1	18,8	398	259	23,4	122	0,310	0,471
	28	12,9	15,1	315	211	16,3	85	0,270	0,401
	15	14,7	18,6	442	296	26,0	133	0,300	0,448
	28	14,5	15,7	368	261	18,1	93	0,250	0,355
	15	13,1	18,6	395	265	24,2	121	0,300	0,460
	28	12,9	16,7	349	237	19,9	101	0,290	0,424
	15	14,5	18,5	433	294	26,8	134	0,310	0,451
	28	14,4	17,8	414	282	22,4	119	0,290	0,423
Berry <i>et al.</i> 2001	12	pâturage		321			107	0,358	
	16	+ compléments		314			85	0,279	
	20	azoté et énergétique		447			92	0,221	

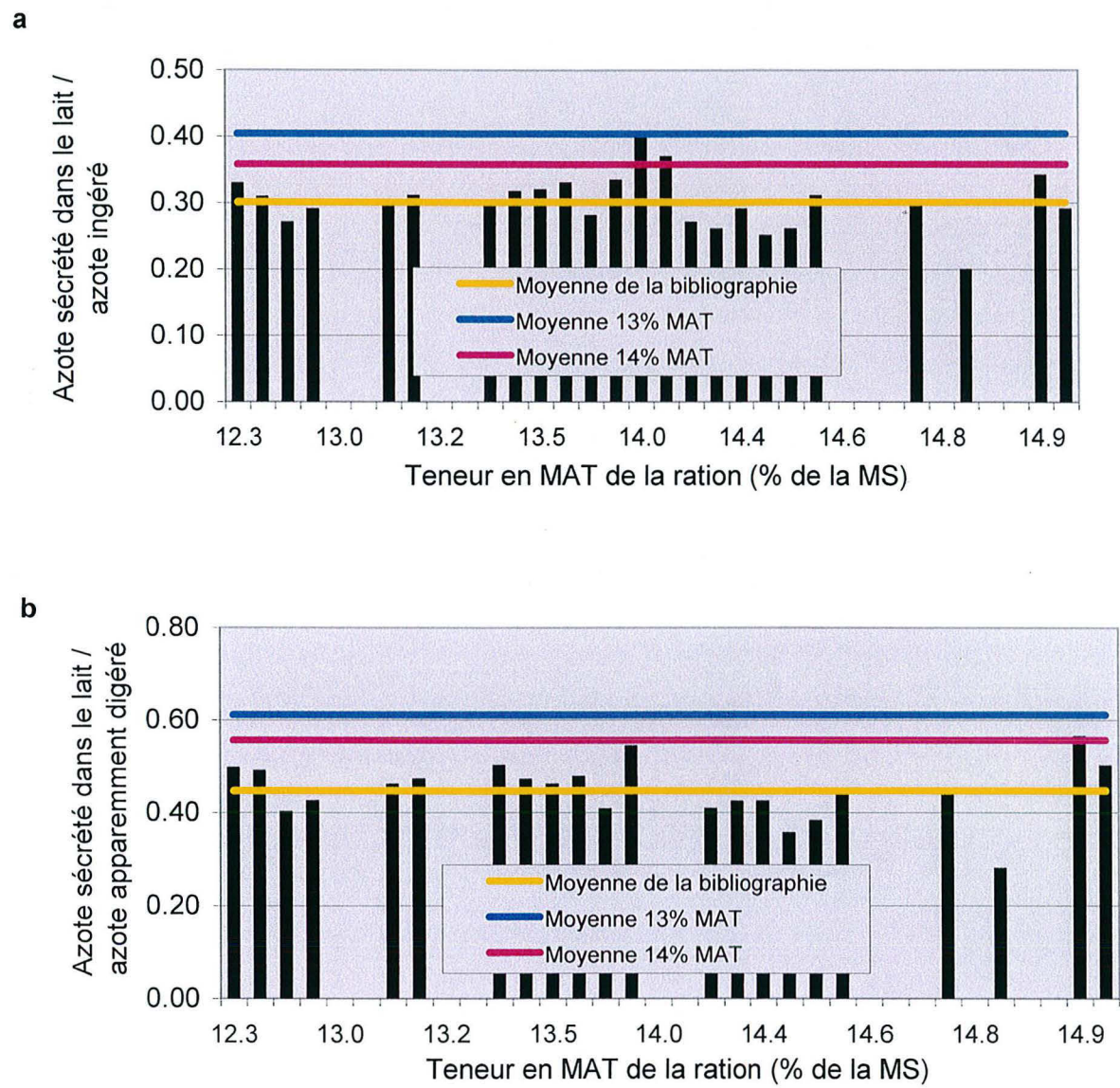
pour les deux régimes (104 contre 101%, NS) et qu'ils ne constituent pas à priori un facteur limitant de la sécrétion d'azote dans le lait.

Pour les deux traitements, les moyennes de la production d'azote dans le lait rapportée à l'azote ingéré ou à l'azote digéré sont presque toujours supérieures à celles de la bibliographie pour une plage proche de teneur en MAT (Figure 35, Annexe 2). Seuls les rapports de Franck *et al.* (2002) sont plus élevés que les nôtres. Ces auteurs ont travaillé avec des rations riches en concentrés (de 40 à 56% de la MS avec de l'orge, de l'avoine, du maïs grain et des pulpes de betteraves) ce qui laisse supposer un déficit des apports en azote fermentescible par rapport à l'énergie. Il est alors probable que leurs conditions expérimentales en ce qui concerne le rumen soient proches des nôtres ou que l'énergie de la ration soit supérieure et conduise à une exportation plus efficace. Par conséquent, l'existence d'un déficit d'azote fermentescible par rapport à l'énergie fermentescible permettrait une valorisation dans le lait plus élevée de l'azote ingéré ou de l'azote digéré.

IV. Conclusion

Le stade de lactation, pour la période des semaines 3 à 18 de la lactation, n'est pas dans nos conditions (ration complète et déficit en azote fermentescible) un facteur de variation important des rapports entre les quantités exportées dans le lait et l'azote ingéré ou l'azote digéré. Le traitement 13% MAT engendre une exportation de l'azote dans le lait plus efficace que le traitement 14% MAT. Les valeurs obtenues pour les deux régimes sont en moyenne supérieures à celles de la littérature pour une gamme proche de teneurs en MAT de la ration. Nos conditions expérimentales génèrent un déficit d'azote fermentescible par rapport à l'énergie fermentescible ($PDIN < PDIE$) qui pourrait constituer un élément explicatif d'une meilleure utilisation des apports alimentaires impliquant une intensité du recyclage d'azote supérieure. Cette observation conforte les résultats de l'expérimentation A.

Figure 35: Comparaison de la sécrétion dans le lait de l'azote ingéré (a) et de l'azote apparemment digéré (b) de l'expérimentation B avec les données de la bibliographie



Expérimentation C

« Effet de l'énergie, pour un niveau de MAT donné de la ration, sur la distribution de l'azote entre le lait, les fèces et l'urine »

I. Objectifs

Dans nos essais précédents, nous avons montré qu'une teneur de 13% MAT dans la ration assure la meilleure valorisation de l'azote alimentaire et que le stade de lactation n'a pas d'effet direct sur ces paramètres. Nos valeurs du rapport azote sécrété dans le lait / azote ingéré sont souvent élevées par rapport à la bibliographie. Avec des apports azotés supérieurs (rations à 14.5 et 16.0% MAT), l'excrétion urinaire représente une part de plus en plus importante de l'azote ingéré ou de l'azote digéré. L'étude des essais rapportés dans la bibliographie a montré, par ailleurs, que l'apport énergétique intervient sur la production de lait et sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote alimentaire. L'hypothèse de travail de cette expérimentation est qu'une fourniture supplémentaire d'énergie pour un niveau azoté donné, peut engendrer une augmentation de la sécrétion d'azote dans le lait d'une part, et une diminution de l'excrétion urinaire d'azote d'autre part.

Dans cet essai nous utilisons deux niveaux azotés et deux niveaux énergétiques pour mesurer l'impact du niveau énergétique de la ration sur l'exportation d'azote dans le lait et sur les excrétions fécale et urinaire, et pour mettre en évidence d'éventuelles interactions entre ces deux facteurs. Les niveaux de MAT retenus sont 14%, utilisé comme référence, et 12%, considéré comme un traitement potentiellement plus économe en azote mais pour lequel la production de lait peut être diminuée. Pour l'énergie, un niveau bas (0.91-0.92 UFL corrigée/kg MS) similaire aux niveaux utilisés lors des expérimentations A et B, et un niveau plus élevé (0.95-0.98 UFL corrigée/kg MS) sont retenus.

La composition des rations ne diffère que par l'absence ou la présence d'un seul aliment (maïs grain). Les apports en azote fermentescible au niveau du rumen sont, pour les quatre régimes, déficitaires par rapport aux apports en énergie fermentescible comme dans les essais précédents (environ 10 g/kg MS). Toutes les vaches mises en lots sont multipares pour éviter tout biais lié à la croissance.

II. Résultats

II.1. Production et composition du lait

II.1.1. Production

Pour un niveau d'azote donné, la production de lait est similaire entre les niveaux bas et haut en énergie (Tableau 38). Elle augmente avec le niveau azoté de la ration (26.4 contre 24.1 kg/j, $P < 0.01$) pour les deux modalités d'énergie confondues. Les mêmes résultats sont obtenus pour la production de lait à 4% de matière grasse. Il n'y a pas d'interaction significative entre les niveaux azoté et énergétique pour ces variables. Les traitements étudiés peuvent donc être considérés indépendamment.

II.1.2. Composition du lait

Les apports croissants d'énergie pour un niveau azoté fixe augmentent le taux protéique (+1.4 et +2.6 g/L pour les traitements bas et haut en azote respectivement, $P < 0.05$) et la quantité totale de matière protéique produite (+76 et +72 g/j pour les traitements bas et haut en azote respectivement, $P < 0.05$) (Tableau 38). Ces paramètres sont également plus élevés pour le niveau haut en azote (32.9 contre 32.2 g/L et 879 contre 774 g/j en moyenne, $P < 0.01$).

Le taux butyreux et la quantité de matière grasse produite ne sont pas différents entre les deux niveaux énergétiques pour un niveau d'azote donné. Le TB diminue pour des apports élevés en azote (43.7 contre 45.9 g/kg, $P < 0.01$) alors que la quantité de matière grasse sécrétée dans le lait est plus forte (1174 contre 1112 g/j, $P < 0.01$).

La concentration cellulaire n'est pas affectée par les facteurs étudiés.

Il n'y a pas d'interaction significative entre les niveaux azoté et énergétique pour l'ensemble de ces paramètres à l'exception du TP.

II.1.3. Composition azotée

Un apport énergétique plus élevé conduit, pour les deux niveaux azotés, à une augmentation ($P < 0.05$) de la teneur en azote total (+256 et +430 mg/L pour les traitements bas et haut en azote respectivement) et en azote protéique (+255 et +421 mg/L). Cette augmentation est également observée pour les teneurs en ANP pour le niveau azoté haut (+8 mg/L) mais il n'y a pas d'effet de l'énergie pour le niveau azoté bas. La teneur en azote

Tableau 38 : Production et composition du lait produit avec les différentes rations

	Traitements				Effets			ETR	
	Azote Energie	bas		haut		Azote	Energie		Azote x Energie
		basse	haute	basse	haute				
Production (kg/j)		23.5 c	24.7 bc	26.1 ab	26.6 a	<0.01	NS	NS	2.0
Lait 4% (kg/j)		25.9 c	27.0 bc	28.5 a	28.2 ab	<0.01	NS	NS	2.1
Taux protéique (g/kg)		31.5 c	32.9 b	31.9 c	34.5 a	<0.01	<0.01	0.05	1.2
Matière protéique (g/j)		736 c	812 b	843 b	915 a	<0.01	<0.01	NS	60
Taux butyreux (g/kg)		46.6 a	45.2 ab	44.1 b	43.4 bc	<0.01	NS	NS	2.9
Matière grasse (g/j)		1094 b	1130 ab	1186 a	1162 a	<0.01	NS	NS	97
Concentration cellulaire (10 ³ /mL)		80	71	102	65	NS	NS	NS	90

NS : Non Significatif
ETR : Ecart-Type Résiduel
a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d’une même ligne significativement différentes (P<0.05)

uréique n'est pas affectée par le niveau énergétique de la ration.

Pour toutes les fractions étudiées, la teneur dans le lait augmente avec le niveau azoté des rations ($P<0.01$), indépendamment de l'énergie: 5621 contre 5387 g/L pour l'azote total, 5338 contre 5138 g/L pour l'azote protéique, 283 contre 250 g/L pour l'ANP et 126 contre 81 g/L pour l'azote uréique (Tableau 39).

L'augmentation de l'énergie engendre, pour les deux niveaux azotés de la ration, des quantités sécrétées dans le lait plus élevées ($P<0.05$) pour l'azote total (+12 et + 14 g/j) et pour l'azote protéique (+12 et +13g/j). L'effet de l'énergie sur les quantités d'ANP est globalement significatif même si la différence entre les niveaux azotés n'atteint pas le seuil de signification. Les quantités d'azote uréique produites sont similaires entre les niveaux énergétiques pour un niveau azoté donné.

Les rations riches en azote aboutissent à des quantités supérieures ($P<0.01$) d'azote total (149 contre 128 g/j), d'azote protéique (141 contre 122 g/j), d'ANP (7.5 contre 6.0 g/j) et d'azote uréique (3.3 contre 2.0 g/j) (Tableau 39).

L'absence d'interaction significative permet de considérer les deux facteurs séparément.

II.2. Excrétion fécale d'azote

L'excrétion fécale d'azote est comprise entre 166 et 171 g d'azote/j (Tableau 40). Aucun effet significatif des traitements n'est montré : les valeurs sont très proches pour les différents traitements et la variabilité est relativement importante.

II.3. Excrétion urinaire

Les teneurs en azote total de l'urine sont significativement plus élevées pour la modalité haute en énergie +0.8 et +1.5 g/L pour les traitements bas et haut en azote respectivement ($P<0.05$) (Tableau 41). L'augmentation des apports en énergie conduit à des teneurs en azote uréique globalement plus élevées ($P<0.01$). Pour le niveau haut en azote, l'effet est significatif (+1.4 g/L) mais il n'y a pas de différence pour le traitement bas. Pour les niveaux d'énergie confondus, l'augmentation de la teneur en azote de la ration entraîne des teneurs plus élevées ($P<0.01$) pour l'azote total (+3.1 g/L) et pour l'azote uréique (+3.1 g/L).

Les quantités d'azote total et d'azote uréique excrétées dans l'urine sont différentes pour le niveau haut en azote (+18 g d'azote urinaire/j et +26 g d'azote uréique/j pour le niveau haut en énergie par rapport au niveau bas, $P<0.05$). Les valeurs obtenues pour le niveau bas en

Tableau 39 : Fractions azotées du lait en teneurs et quantités sécrétées
en fonction des différents traitements

Traitements					Effets			ETR
Azote	bas		haut		Azote	Energie	Azote x Energie	
Energie	basse	haute	basse	haute				
Teneurs (mg/L)								
Azote total	5259 c	5515 b	5406 bc	5836 a	<0.01	<0.01	NS	220
Azote protéique	5010 c	5265 b	5128 bc	5549 a	<0.01	<0.01	NS	218
Azote non protéique	249 c	251 c	279 b	287 a	<0.01	<0.10	NS	11
Azote uréique	81 b	82 b	125 a	126 a	<0.01	NS	NS	13
Quantités (g/j)								
Azote total	122 c	134 b	142 b	156 a	<0.01	<0.01	NS	12
Azote protéique	116 c	128 b	135 b	148 a	<0.01	<0.01	NS	12
Azote non protéique	5.8 b	6.2 b	7.3 a	7.7 a	<0.01	<0.05	NS	0.7
Azote uréique	1.9 b	2.0 b	3.2 a	3.4 a	<0.01	NS	NS	0.5

NS : Non Significatif

ETR : Ecart-Type Résiduel

a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0.05)

Tableau 40 : Excrétion fécale d'azote et digestibilité pour les différents traitements

	Traitements					Effets			ETR
	Azote	bas		haut		Azote	Energie	Azote x	
	Energie	basse	haute	basse	haute			Energie	
N fécal (g/j)		166	171	167	167	NS	NS	NS	14
N digéré (g/j)		200 d	232 c	278 b	318 a	<0.01	<0.01	NS	19
Digestibilité d'azote (%)		54.5 d	57.5 c	61.9 b	65.6 a	<0.01	<0.01	NS	3

NS : Non Significatif

ETR : Ecart-Type Résiduel

a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0.05)

azote suivent la même tendance mais ne sont pas statistiquement différentes. La modalité haute d'azote conduit à des quantités moyennes supérieures ($P < 0.01$) d'azote total (+52 g/j) et d'azote uréique (+42 g/j) par rapport à la modalité basse d'azote.

Les interactions entre les niveaux azotés et énergétiques de la ration sont significatives pour les quantités d'azote total et d'azote uréique produites dans l'urine.

II.4. Ingestion et digestibilité apparente de l'azote

Les quantités de MS ingérée sont comprises entre 19.2 et 21.3 kg/j (Tableau 42). Les niveaux haut en énergie conduisent à des ingestions de MS supérieures à celles des niveaux bas (+1.3 et +1.1 kg/j pour chacun des deux niveaux azotés, $P < 0.05$). De même ils engendrent des ingestions plus élevées d'azote (+37 et +38 g/j), de PDIN (+192 et +208 g/j), de PDIE (+209 et +239 g/j), de PDIA (+133 et +145 g/j) et d'énergie (+1.6 UFL/j pour les deux comparaisons). Les régimes les plus riches en azote conduisent à des ingestions de MS, d'azote, de PDIN, de PDIE et de PDIA les plus élevées ($P < 0.01$) ; c'est également le cas pour les ingestions d'énergie ($P < 0.05$).

L'augmentation de la teneur en énergie de la ration pour un niveau d'azote donné est accompagnée d'une augmentation de la quantité d'azote digéré (+32 et +40 g/j pour les traitements bas et haut en azote respectivement, $P < 0.05$) et de la digestibilité apparente de l'azote (+3.0 et +3.7 points, $P < 0.05$, Tableau 40). De même, les niveaux azotés hauts conduisent à des quantités plus élevées d'azote digéré (298 contre 216 g/j, $P < 0.01$) et à une digestibilité de l'azote plus forte (63.7 contre 56.0%, $P < 0.01$).

Pour l'ensemble de ces variables, aucune interaction significative n'est montrée entre les niveaux azotés et énergétiques de la ration.

II.5. Digestion ruminale des rations

Les taux de disparition de la matière sèche, de la matière organique et de la matière azotée des quatre rations reconstituées suivent la même évolution (Figure 36) : environ 45% des fractions disparaissent instantanément. Au-delà, la disparition est régulière et quasi-linéaire jusqu'à 24 heures pour atteindre entre 80 et 90% après 48 heures d'incubation. Les différences qui existent entre les traitements en début de cinétique sont faibles et totalement

Tableau 41 : Excrétion urinaire d’azote

Traitements					Effets			
Azote	bas		haut		Azote	Energie	Azote x Energie	ETR
Energie	basse	haute	basse	haute				
Teneurs (g/L)								
Azote total	6.1 d	6.9 c	8.8 b	10.3 a	<0.01	<0.01	NS	0.9
Azote uréique	3.2 c	3.7 c	5.8 b	7.2 a	<0.01	<0.01	<0.10	0.9
Quantités (g/j)								
Azote total	77 c	83 c	123 b	141 a	<0.01	<0.01	<0.05	11
Azote uréique	20 c	27 c	53 b	79 a	<0.01	<0.01	<0.01	13

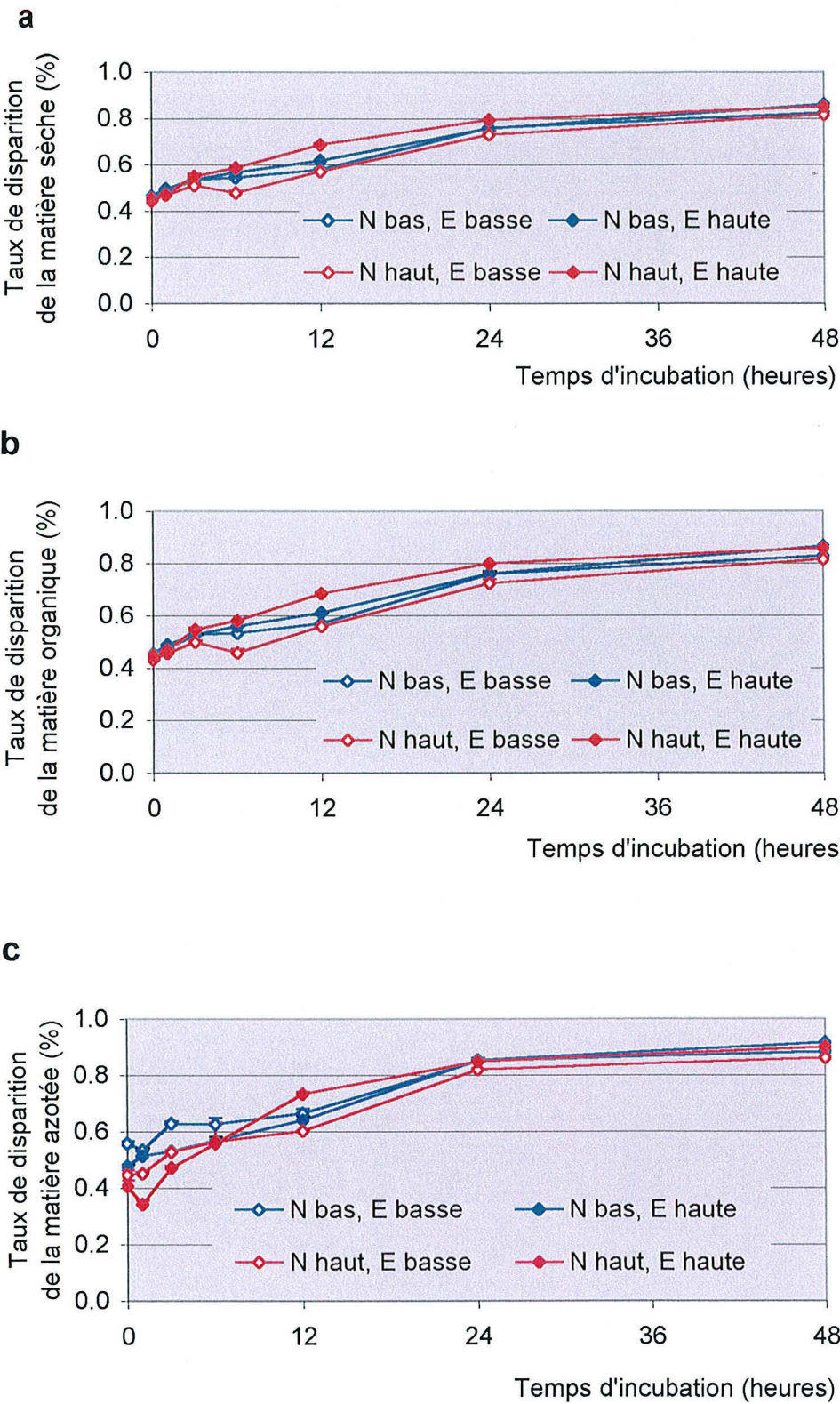
NS : Non Significatif
ETR : Ecart-Type Résiduel
a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d’une même ligne significativement différentes (P<0.05)

Tableau 42 : Ingestion de matière sèche, d’azote et d’énergie pour les différents traitements

	Traitements				Effets				
	Azote	bas		haut		Azote	Energie	Azote x Energie	ETR
	Energie	basse	haute	basse	haute				
MS ingérée (kg/j)		19.2 c	20.5 b	20.2 b	21.3 a	<0.01	<0.01	NS	0.9
Azote ingéré (g/j)		366 d	403 c	447 b	485 a	<0.01	<0.01	NS	20
PDIN ingérées (g/j)		1452 d	1644 c	1810 b	2018 a	<0.01	<0.01	NS	81
PDIE ingérées (g/j)		1613 c	1822 b	1857 b	2096 a	<0.01	<0.01	NS	82
PDIA ingérées (g/j)		556 d	689 c	746 b	891 a	<0.01	<0.01	NS	36
Energie ingérée (UFL/j)		16.3 c	17.9 b	16.7 c	18.3 a	<0.05	<0.01	NS	0.8

NS : Non Significatif
ETR : Ecart-Type Résiduel
a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d’une même ligne significativement différentes (P<0.05)

Figure 36: Disparition *in sacco* de la matière sèche (a), de la matière organique (b) et de la matière azotée (c) des rations reconstituées



atténuées à 48 heures. Ces résultats sont modélisés par les paramètres de dégradation ruminale du modèle d'Ørskov et McDonald (Tableau 43). Pour les paramètres de ce modèle les écarts qui distinguent les quatre rations restent d'amplitude modérée.

Tableau 43 : Paramètres de dégradation ruminale des rations
selon le modèle d'Ørskov et McDonald (1979)

Fraction	Traitement		a	b	c	DT
	Azote	Energie	%	%	%/h	%
Matière sèche	bas	basse	46.6	45.7	3.4	63.1
	bas	haute	47.3	48.0	3.5	65.0
	haut	basse	44.3	52.3	2.7	60.5
	haut	haute	45.2	41.3	7.1	67.6
Matière organique	bas	basse	45.6	47.8	3.4	62.9
	bas	haute	46.5	49.8	3.5	64.8
	haut	basse	42.9	55.4	2.6	59.6
	haut	haute	45.0	42.7	6.8	67.7
Matière azotée	bas	basse	54.3	40.0	4.5	71.4
	bas	haute	47.2	53.8	4.0	68.7
	haut	basse	44.0	48.5	4.8	65.5
	haut	haute	35.0	56.9	8.3	68.0

a : fraction disparaissant instantanément dans le rumen

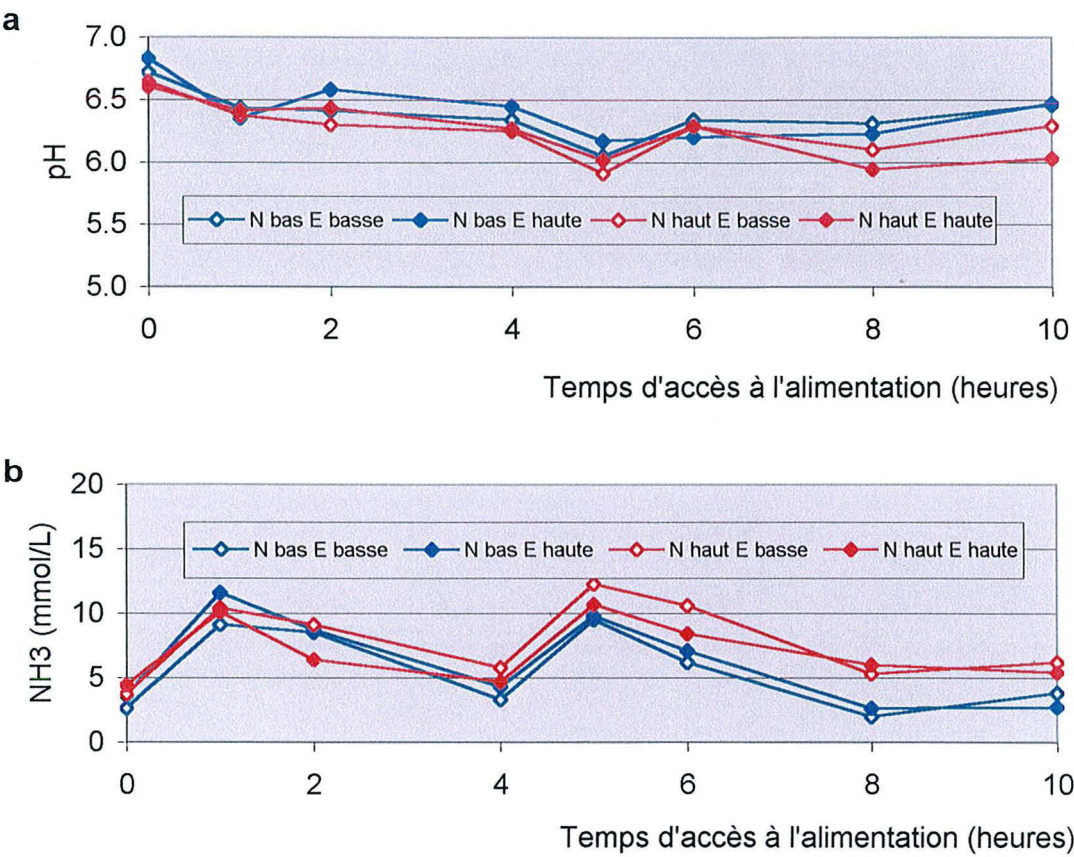
b : fraction progressivement dégradable dans le rumen

c : vitesse de disparition de la fraction progressivement dégradable

DT : dégradabilité théorique

Le pH du liquide ruminal est compris entre 5.9 et 6.8 pour l'ensemble des traitements avec des valeurs très exceptionnellement inférieures à 6.0. Les valeurs diminuent après l'accès à l'alimentation pour atteindre un minimum à 5 heures sauf pour le traitement « azote haut, énergie haute » pour lequel le pH est faible pour ce temps (6.0) mais dont le minimum est atteint à 8 heures (5.9) (Figure 37a). Au-delà, les pH varient avec une remontée lente. La teneur en ammoniac se situe dans un intervalle de 2.0 à 12.3 mmol/L (Figure 37b). Les maxima sont observés 1 heure après chacun des deux repas principaux (T1 et T5) alors que les minima sont atteints 4 heures après (Figure 37b). Ces deux paramètres sont affectés par le

Figure 37: Variation du pH et de la teneur en NH3 du liquide ruminal



niveau de MAT de la ration ($P<0.01$) mais ne varient pas avec le niveau énergétique. Ainsi, le pH est significativement plus faible (6.26 contre 6.40, $P<0.01$) et la teneur en ammoniac significativement plus élevée (7.5 contre 6.0 mmol/L, $P<0.01$) en moyenne pour les traitements admettant le niveau haut en azote. Il n'y a pas d'interaction significative entre les deux facteurs étudiés pour ces deux paramètres (NS).

Le profil fermentaire des rations distribuées (Tableau 44) conduit à des teneurs en AGV totaux qui augmentent de façon modérée mais significative ($P<0.01$) après les repas (entre 0 et 2, et entre 4 et 6 ou 8 heures après l'accès à l'alimentation) puis qui diminuent. L'énergie n'affecte pas significativement la teneur en AGV totaux pour les régimes azote bas alors que pour le niveau haut, la teneur en AGV totaux est plus faible pour la modalité énergie haute (-12 mmol/L). Les proportions molaires d'acétate n'évoluent pas avec une tendance particulière malgré un effet significatif du temps ($P<0.05$). Cette variable est plus faible avec l'apport d'énergie haute pour le niveau haut en azote (-3.4 points) en absence de variations significatives pour les rations basses en azote. Les proportions de propionate et de butyrate restent relativement stables au cours de la cinétique, également avec un effet significatif du temps ($P<0.01$). Les parts de propionate sont diminuées avec l'augmentation d'énergie pour le niveau azoté bas (-2.2 points) alors que les parts de butyrate augmentent avec le niveau énergétique pour les deux niveaux d'azote (+2.1 points pour les deux comparaisons).

II.6. Distribution de l'azote ingéré

La distribution de l'azote ingéré est entendue comme la quantité d'azote recueillie dans chacun des compartiments (lait, urine et fèces) rapportée à la quantité d'azote ingéré.

Les apports énergétiques de la ration n'ont pas d'effet sur les parts de l'azote ingéré que représentent l'azote total, l'azote protéique, l'ANP et l'azote uréique du lait (Tableau 45). La part de l'azote ingéré recueilli dans le lait diminue avec l'augmentation du niveau azoté de la ration pour l'azote total avec des valeurs de 31.7 contre 33.3 % ($P<0.05$) et pour l'azote protéique de 30.1 contre 31.7% ($P<0.01$). Elle augmente pour l'azote uréique soit 0.7 contre 0.5% ($P<0.01$). Par contre les parts de l'azote ingéré recueillies dans la fraction non protéique sont similaires pour les deux niveaux d'azote.

Rapportées à l'azote ingéré, les excréctions urinaires d'azote sont similaires lors d'une augmentation des apports énergétiques, pour un niveau d'azote donné. En revanche, la part de l'azote ingéré que représente l'azote uréique de l'urine augmente avec l'énergie pour le niveau haut en azote (+1.3 point) alors que pour le niveau bas en azote, cette différence

Tableau 44 : Profil fermentaire dans le rumen selon la nature des rations

Traitement	AGV totaux mmol/L					Acétate mol/100mol				Propionate mol/100mol				Butyrate mol/100mol			
	Azote	bas		haut		bas		haut		bas		haut		bas		haut	
	Energie	basse	haute	basse	haute	basse	haute	basse	haute	basse	haute	basse	haute	basse	haute	basse	haute
Temps (h)	0	82.6	76.2	94.2	86.5	58.5	58.5	58.7	54.7	22.2	20.3	20.6	22.5	14.6	16.4	16.1	17.4
	1	86.0	87.7	104.9	90.1	55.9	58.9	58.8	56.1	24.7	21.6	22.0	22.3	14.5	14.8	14.8	16.6
	2	94.2	87.2	106.3	86.1	55.0	57.9	57.9	54.1	25.0	20.6	22.1	22.2	14.8	16.4	15.0	18.0
	4	89.2	84.0	98.1	81.6	59.3	58.1	59.4	55.5	22.0	20.4	20.9	22.2	14.0	16.4	15.1	17.0
	5	105.3	92.5	107.7	91.6	57.9	56.1	60.2	56.4	23.2	21.9	21.9	22.1	14.1	17.0	13.7	16.4
	6	99.7	96.9	99.8	89.5	56.1	56.9	56.8	54.9	23.1	20.1	22.8	21.6	15.3	17.6	15.2	17.7
	8	91.8	92.4	105.8	99.2	57.8	56.2	57.5	53.9	22.1	20.7	21.2	22.4	15.2	17.7	16.0	17.7
	10	91.9	91.3	94.6	93.7	59.2	56.8	58.3	55.3	21.8	20.6	21.2	21.4	14.3	17.2	15.5	17.5
	Moyenne	92.6 b	88.5 b	101.4a	89.8 b	57.5 a	57.4 a	58.5 a	55.1 b	23.0 a	20.8 b	21.6 b	22.1 b	14.6 b	16.7 ac	15.2 bc	17.3 a
Effets	Azote	NS				NS				NS				NS			
	Energie	<0.01				<0.01				NS				<0.01			
	Azote x Energie	NS				<0.01				<0.01				NS			
	Temps	<0.01				<0.05				<0.01				<0.01			
ETR		10.1				2.2				1.6				1.7			

NS : Non Significatif

ETR : Ecart-Type Résiduel

a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0.05)

Tableau 45 : Distribution de l'azote ingéré dans le lait, l'urine et les fèces

Distribution (en %)	Traitements					Effets			
	Azote Energie	bas		haut		Azote	Energie	Azote x Energie	ETR
		basse	haute	basse	haute				
N lait / N ingéré		33.4 A	33.2 B	31.5 AC	31.8 BC	<0.05	NS	NS	2.7
N protéines lait / N ingéré		31.8 a	31.7 a	29.9 b	30.2 b	0.01	NS	NS	2.6
ANP lait / N ingéré		1.6	1.5	1.6	1.6	NS	NS	NS	0.1
N uréique lait / N ingéré		0.5 b	0.5 b	0.7 a	0.7 a	<0.01	NS	NS	0.1
N urinaire / N ingéré		21.1 b	20.8 b	27.7 a	29.0 a	<0.01	NS	NS	2.6
N urée urine / N ingéré		5.7 c	6.9 c	12.2 b	16.3 a	<0.01	<0.01	NS	3.0
N fécal / N ingéré		45.5 a	42.5 b	38.0 c	34.4 d	<0.01	<0.01	NS	3.0

NS : Non Significatif

ETR : Ecart-Type Résiduel

a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0.05)

A, B, C : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0.10)

Tableau 46 : Distribution de l'azote apparemment digéré dans le lait et l'urine

Distribution (en %)	Traitements					Effets			
	Azote Energie	bas		haut		Azote	Energie	Azote x Energie	ETR
		basse	haute	basse	haute				
N lait / N digéré		62.1 a	58.8 a	51.0 b	48.9 b	<0.01	NS	NS	6.1
N protéines lait / N digéré		59.1 a	56.1 a	48.4 b	46.5 b	<0.01	NS	NS	5.9
ANP lait / N digéré		2.9 a	2.7 b	2.6 b	2.4 c	<0.01	<0.01	NS	0.3
N uréique lait / N digéré		1.0 bc	0.9 c	1.1 a	1.0 b	<0.01	<0.01	NS	0.1
N urinaire / N digéré		38.8 b	36.4 b	45.0 a	45.0 a	<0.01	NS	NS	5.4
N urée urine / N digéré		10.3 c	12.1 c	20.1 b	25.0 a	<0.01	<0.01	NS	5.2

NS : Non Significatif

ETR : Ecart-Type Résiduel

a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d'une même ligne significativement différentes (P<0.05)

n'atteint pas le seuil de signification. Les rapports entre les quantités d'azote total (28.4 contre 21.0%) et d'azote uréique (14.3 contre 6.3%) excrété dans l'urine et l'azote ingéré sont significativement plus élevés pour le niveau haut en azote ($P < 0.01$).

II.7. Distribution de l'azote digéré

La distribution de l'azote digéré est entendue comme la quantité d'azote recueillie dans chacun des compartiments (lait et urine) rapportée à la quantité d'azote apparemment digéré.

L'énergie n'affecte pas les parts de l'azote digéré que représentent l'azote total et l'azote protéique du lait (Tableau 46). Par contre des parts plus faibles avec les niveaux hauts en énergie pour les deux traitements d'azote sont observées pour l'ANP (-0.2 point en moyenne) et pour l'azote uréique (-0.1 point en moyenne). Les teneurs basses en azote de la ration conduisent à des parts de l'azote digéré plus élevées ($P < 0.01$) pour l'azote total (60.5 contre 49.9%), pour l'azote protéique (57.6 contre 47.4%) et l'ANP du lait (2.8 contre 2.5%) mais plus faible pour l'azote uréique du lait (0.9 contre 1.1%, $P < 0.01$).

L'énergie n'a pas d'effet sur le rapport entre l'azote urinaire et l'azote digéré. L'excrétion d'azote uréique dans l'urine rapportée à l'azote digéré est augmentée par le niveau haut en énergie pour les rations les plus riches en azote (+4.9 points). Les rations les plus concentrées en azote engendrent des parts plus élevées ($P < 0.01$) de l'azote digéré produites dans l'azote urinaire total (45.0 contre 37.6%) et l'azote uréique (22.6 contre 11.2%).

II.8. Paramètres sanguins

L'urémie évolue de manière significative ($P < 0.01$) au cours du temps mais avec une faible ampleur (Tableau 47). Le niveau d'énergie n'a pas d'effet significatif alors que les valeurs sont significativement plus élevées pour le traitement haut en azote (0.25 contre 0.17 g/L, $P < 0.01$).

La teneur en AGNE du plasma diminue globalement au cours du temps ($P < 0.01$) et surtout entre 0 et 4 heures. Une forte variabilité des mesures ($ETR = 27.5 \mu\text{mol/L}$) ne permet toutefois pas de mettre en évidence d'effet significatif des niveaux énergétique et azoté.

Les teneurs plasmatiques en glucose, acéto-acétate et β -hydroxy-butyrate ne sont pas affectées par les niveaux d'énergie et d'azote dans la ration. Seule la teneur en β -hydroxy-butyrate augmente significativement au cours de la cinétique ($P < 0.01$).

Tableau 47 : Evolution des teneurs plasmatiques des différents paramètres sanguins
en fonction du traitement

Traitements						Effets					
	Temps	Azote Energie	bas		haut		Azote	Energie	Temps	Azote x Energie	ETR
			basse	haute	basse	haute					
Urée g/L	0		0.16	0.16	0.24	0.26					
	4		0.18	0.17	0.24	0.26	<0.01	NS	<0.01	NS	0.04
	8		0.18	0.17	0.26	0.26					
	Moyenne		0.17 b	0.17 b	0.25 a	0.25 a					
AGNE μmol/L	0		92	98	129	93					
	4		55	67	80	62	NS	NS	<0.01	NS	27
	8		54	61	81	58					
	Moyenne		67	75	97	71					
Glucose g/L	0		0.63	0.67	0.67	0.67					
	4		0.62	0.61	0.65	0.68	NS	NS	NS	NS	0.05
	8		0.63	0.60	0.63	0.67					
	Moyenne		0.63	0.63	0.65	0.67					
Acéto- acétate μmol/L	0		55	35	37	44					
	4		48	105	43	45	NS	NS	NS	NS	36
	8		41	103	68	41					
	Moyenne		48	81	49	43					
β- hydroxy butyrate μmol/L	0		549	553	722	539					
	4		796	1224	861	790	NS	NS	<0.01	NS	243
	8		909	1319	982	1023					
	Moyenne		751	1032	855	784					

NS : Non Significatif

ETR : Ecart-Type Résiduel

a, b : lettres différentes pour les valeurs d’une même ligne significativement différentes (P<0.05)

II.9. Taux de couverture des besoins

Les taux de couverture des besoins en PDIN et en PDIE sont compris entre 92 et 113% (Tableau 48). Pour le niveau azote bas, ils augmentent avec le niveau énergétique (+6 points pour les PDIN et +7 points pour les PDIE), alors qu’aucun effet de l’énergie n’est observé pour le traitement azote haut. Le niveau d’azote de la ration augmente les taux de couverture des besoins azotés avec des niveaux de couverture plus élevés en PDIN (108 contre 95%) et en PDIE (112 contre 106%) (P<0.01).

Les taux de couverture des besoins énergétiques sont plus élevés (P<0.01) avec les rations haute en énergie quel que soit le traitement en azote (+9 et +7 points pour les traitements bas et haut en azote respectivement, P<0.01). Il n’y a pas d’effet du niveau azoté sur ce paramètre.

Les interactions entre les niveaux d’azote et d’énergie ne sont pas significatives pour ces variables.

Tableau 48 : Taux de couverture des besoins azotés et énergétiques des différentes rations

	Traitements					Effets			ETR
	Azote	bas		haut		Azote	Energie	Azote x	
	Energie	basse	haute	basse	haute			Energie	
Taux de couverture (%)									
PDIN		92 c	98 b	107 a	109 a	<0.01	<0.05	NS	8
PDIE		102 b	109 a	110 a	113 a	<0.01	<0.05	NS	8
UFL		94 b	103 a	94 b	101 a	NS	<0.01	NS	9

NS : Non Significatif
ETR : Ecart-Type Résiduel
a, b, c : lettres différentes pour les valeurs d’une même ligne significativement différentes (P<0.05)

III. Discussion

Pour un niveau donné d’azote dans la ration, une augmentation de l’apport d’énergie est accompagnée d’une sécrétion plus importante d’azote dans le lait. A partir des résultats de Belyea et Adams (1990), Susmel *et al.* (1995), Dhiman et Satter (1997), Peyraud *et al.* (1997a), Rodriguez *et al.* (1997) et Piepenbrink *et al.* (1998), il apparaît une tendance générale de diminution de la sécrétion d’azote dans le lait lorsque le rapport entre l’azote et

l'énergie de la ration est décroissant (Figure 17). Il faut, cependant, être prudent dans l'interprétation de cette tendance, car la diminution du rapport azote/énergie de la ration peut être la conséquence d'une augmentation de l'énergie pour des niveaux fixes d'azote ou une diminution de l'azote pour des niveaux fixes d'énergie. Pour Maija et Schingoethe (1997), l'azote du lait reste relativement constant pour des rations avec des niveaux de MAT proches et des apports croissants en énergie ; quant à Roseler *et al.* (1993) qui ont augmenté la teneur en azote pour un niveau fixe d'énergie, ils n'observent pas d'effet significatif sur l'azote du lait.

Une excrétion urinaire d'azote croissante avec le niveau énergétique comme nous l'observons pour le traitement azote haut, n'est pas concordante avec les données de la littérature. En effet, Kebreab *et al.* (2002) supposent plutôt, à partir de leur modèle dynamique, une diminution des pertes ruminales d'ammoniac qui serait accompagnée d'une diminution des quantités d'azote urinaire, cette hypothèse reprenant les suggestions de Norton *et al.* (1982a) et de Wright *et al.* (1998). Par ailleurs, Giraldez *et al.* (1997) évoquent un déplacement de l'excrétion d'azote de l'urine vers les fèces lors d'un apport supplémentaire d'énergie fermentescible. Pour expliquer nos résultats, apparemment en contradiction avec les données de la bibliographie, il faut considérer l'augmentation d'ingestion d'azote qui accompagne l'augmentation du niveau énergétique de la ration. Ainsi, il est très probable que l'excrétion urinaire d'azote soit augmentée par une ingestion supérieure d'azote suite à l'augmentation des apports d'énergie dans la ration, ce qui n'est pas dans les travaux de Kebreab *et al.* (2002) et de Giraldez *et al.* (1997) qui se situent à un niveau fixe d'azote ingéré.

Le niveau haut en énergie ne conduit pas à une augmentation de l'excrétion d'azote dans les fèces contrairement à ce que prédit le modèle de Kebreab *et al.* (2002). L'absence d'effet des traitements étudiés sur cette variable pourrait s'expliquer par des variations modérées de composition entre les différents régimes. Elle pourrait également trouver une explication dans l'augmentation de l'ingestion d'azote suite à l'augmentation du niveau énergétique de la ration qui a pour conséquence d'augmenter la digestibilité apparente de l'azote. Ainsi, il est probable que l'excrétion fécale d'azote reste stationnaire grâce à une compensation de l'ingestion accrue d'azote par une augmentation de sa digestibilité.

Les pH du liquide ruminal sont très exceptionnellement inférieurs à 6 au cours de la cinétique post-prandial, ce qui est reconnu par Sauviant *et al.* (1999) pour garantir l'absence de risque d'acidose. De plus, les teneurs en NH_3 les plus faibles se situent aux alentours de

3 mmol/L, ce qui est admis comme le seuil assurant un développement maximum de la flore ruminale par Satter et Slyter (1974) et Hoover (1986). Pour la modalité basse en azote, les profils fermentaires et les dégradations *in sacco* des rations sont similaires pour les deux niveaux d'énergie. En revanche avec les apports hauts en azote, il semblerait que l'intensité de fonctionnement du rumen soit supérieure, d'après les teneurs en NH_3 et en AGV totaux du liquide ruminal, pour le régime bas en énergie. Les conditions expérimentales (théoriques) souhaitées ne sont, par conséquent, pas pleinement confirmées. Même si les écarts observés restent modestes, un effet de la dégradabilité ruminale des rations ne peut pas être exclu des paramètres qui influencent potentiellement la distribution de l'azote ingéré.

Dans nos conditions expérimentales, un apport d'énergie supplémentaire pour un niveau fixe d'azote n'améliore pas la part de l'azote total et de l'azote protéique du lait rapportée à l'azote ingéré. Cette observation conforte les résultats obtenus par Maija et Schingoethe (1997) et Piepenbrink *et al.* (1998). La tendance générale indique, cependant, une augmentation du rapport azote du lait / azote ingéré quand le rapport entre l'azote et l'énergie de la ration est décroissant (Roseler *et al.*, 1993 ; Dhiman et Satter, 1997 ; Peyraud *et al.*, 1997a). Toutefois, pour ces auteurs, la diminution du rapport azote/énergie de la ration est due à une diminution de la MAT pour des apports fixes en énergie. Nos observations peuvent également être expliquées en partie par les ingestions d'azote plus élevées pour la modalité haute en énergie. L'effet prévisible de l'augmentation de l'apport énergétique serait alors une meilleure valorisation dans le lait de l'azote mais cet effet serait plus que compensé par un effet contraire dû à l'augmentation de la consommation d'azote qui se produit simultanément.

La part de l'azote ingéré excrété dans les fèces est décroissante avec les apports d'énergie. Ce résultat va à l'encontre des observations de McCarthy *et al.* (1989), et de Berry *et al.* (2001) pour qui au pâturage, la complémentation par un concentré énergétique ne conduit pas à une modification de la digestibilité. Kebreab *et al.* (2002) considèrent qu'une augmentation des apports en énergie engendre une part plus importante d'azote dans les fèces principalement due aux micro-organismes.

La part de l'azote ingéré ou de l'azote digéré excrétée dans l'urine n'est pas affectée par le niveau énergétique de la ration (NS). En revanche des apports croissants en énergie sont accompagnés d'excrétion d'azote uréique dans l'urine qui constituent des parts plus élevées de l'azote ingéré ou digéré pour le traitement haut en azote. Ce résultat ne confirme pas les données de Kebreab *et al.* (2002) qui rapportent une diminution des pertes urinaires d'azote lors d'apports croissants d'énergie mais pour des situations d'ingestions fixes d'azote. Ces

auteurs précisent que l'impact de l'énergie est d'autant plus marqué que le niveau d'ingestion d'azote est élevé. Les observations réalisées à partir des données de Berry *et al.* (2001) vont dans le même sens que celles de Kebreab *et al.* (2002). Cependant, leurs travaux ont été menés au pâturage et par conséquent avec une estimation des quantités d'azote ingéré, ce qui conduit à une relative incertitude sur les effets observés. En général, il est attendu que l'apport supplémentaire d'énergie engendre une diminution de la part de l'azote ingéré ou digéré représentée par l'azote urinaire. Mais l'augmentation de l'ingestion d'azote, suite à l'augmentation du niveau énergétique, devrait conduire à une excrétion urinaire de l'azote ingéré ou digéré plus élevée. Il semble donc que les deux effets se compensent pour le niveau bas d'azote et seulement pour l'azote total de l'urine du niveau haut d'azote. Pour ce dernier régime, la part de l'azote ingéré ou digéré que représente l'azote uréique de l'urine est augmentée certainement parce que la compensation due à l'énergie supplémentaire n'est pas complète. Il peut alors être envisagé que l'apport supplémentaire d'énergie associé à ce niveau d'azote soit trop faible.

Dans un système de contraintes privilégiant la limitation des rejets d'azote dans l'environnement et le maintien de la production laitière ainsi que celui de la production de protéines du lait, nous recherchons le traitement qui permet le meilleur compromis entre ces paramètres. Pour les deux niveaux d'azote, une augmentation des apports énergétiques est favorable en terme de compromis. Pour le niveau bas en azote (12% MAT), un apport supplémentaire d'énergie est accompagné d'une augmentation de 5.1% de la production de lait et d'une baisse de -5.3% du rapport entre l'azote total excrété (urine + fèces) et l'azote sécrété sous forme de protéines dans le lait (Tableau 49). Pour le niveau haut en azote (14% MAT), l'effet de l'énergie est moins marqué sur la production (+1.9%) et sur l'excrétion totale d'azote rapportée à l'azote des protéines du lait (-3.3%). Le traitement azote bas associé à des apports hauts en énergie semble donc conduire à la ration pour laquelle le compromis, tel qu'il est défini, est le plus intéressant.

L'effet majeur d'un apport d'énergie supplémentaire pour un niveau azoté donné est une amélioration de la digestibilité apparente de l'azote. Nos résultats peuvent être comparés aux données de la bibliographie obtenues pour une même gamme de teneur en MAT de la ration et dont les références sont présentées en Annexe 3.

Tableau 49 : Compromis entre la valorisation de l’azote dans les protéines du lait,
l’excrétion et la production laitière

Azote	bas		haut	
Energie	basse	haute	basse	haute
N protéique du lait (g/j)	116	128	135	148
N total excrété (urine+ fèces) (g/j)	243	254	290	308
Production (kg/j)	23.5	24.7	26.1	26.6
	=> + 5.1% =>		=> + 1.9% =>	
N total excrété / N protéique du lait	2.09	1.98	2.15	2.08
	=> - 5.3% =>		=> - 3.3% =>	

Nos valeurs de 31.5 à 33.4% de l'azote ingéré sécrété dans l'azote total du lait sont légèrement supérieures à la moyenne des données bibliographiques (Figure 38). Dans la littérature quelques références rapportent des valeurs supérieures aux nôtres : Kebreab *et al.* (2000) et Frank *et al.* (2002) qui travaillent vraisemblablement dans des conditions d'azote fermentescible déficitaire par rapport à l'énergie fermentescible. Susmel *et al.* (1995) observent également des parts de l'azote ingéré sécrété dans le lait supérieures pour une ration présentant un déficit d'azote fermentescible ($PDIN - PDIE = -17$ g/kg MS). Par conséquent, la condition d'optimisation du recyclage d'azote apparaît comme un facteur favorisant l'exportation de l'azote ingéré ou digéré dans le lait. Dans nos conditions, les régimes hauts en azote présentent un déficit en azote fermentescible plus faible que le déficit mis en place pour les régimes bas ($PDIN - PDIE = 4$ contre 9 g/kg MS). L'intensité de recyclage engendré par ces conditions, est donc plus élevée pour la modalité basse en azote. Or, les traitements hauts en azote aboutissent à des écarts entre la part de l'azote digéré recueilli dans le lait et la moyenne de la littérature, relativement faibles, probablement en raison du déficit d'azote fermentescible obtenu pour ces régimes.

L'excrétion fécale d'azote représente une part moyenne de l'azote ingéré qui est plus élevée que la moyenne de la bibliographie (Figure 39). L'écart entre les données du traitement bas en azote et la moyenne de la bibliographie est plus important qu'avec le traitement haut en azote. Comme la grande majorité des références citées observent des rapports entre l'azote fécal et l'azote ingéré inférieurs aux nôtres, cet effet ne peut pas être attribué à des conditions expérimentales particulières. Cependant il semblerait que les niveaux de MAT les plus faibles (11.0-11.2% MAT) conduisent à des valeurs élevées et du même ordre de grandeur que celle du niveau bas en azote de notre essai. Pour les régimes hauts en azote présentant un déficit faible en azote fermentescible, les valeurs observées sont très proches de celle de la moyenne de la bibliographie. L'utilisation du marqueur interne (cendres insolubles dans l'HCl) avec des prélèvements d'échantillons aléatoires dans notre essai pourrait être une cause de sur-estimation de l'excrétion fécale comme l'ont démontré Jurjanz *et al.* (2002). Ceci engendrerait une sous-estimation de la digestibilité et donc une sur-estimation des parts de l'azote digéré représentées par l'azote du lait et l'azote urinaire. Cette hypothèse ne semble pas, cependant, être confirmée puisque les effets observés à partir de l'azote ingéré pour l'azote du lait et l'azote urinaire sont similaires à ceux obtenus quand ces variables sont rapportées à l'azote digéré.

L'excrétion urinaire d'azote obtenue dans notre essai représente des parts de l'azote ingéré en moyenne inférieures aux parts observées dans les références rapportées dans la Figure 40.

Figure 38: Comparaison de la sécrétion dans le lait de l'azote ingéré (a) et de l'azote apparemment digéré (b) de l'expérimentation C avec les données de la bibliographie

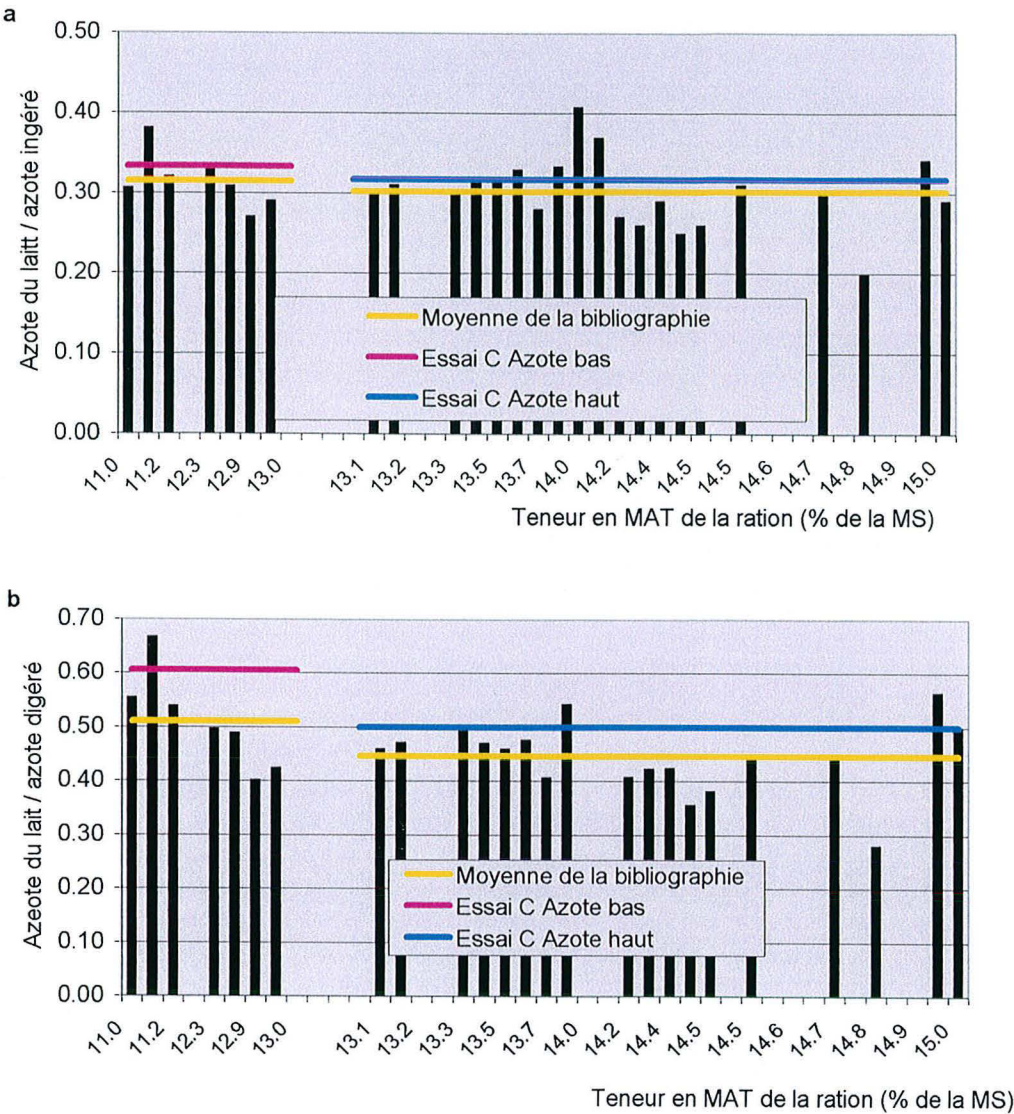
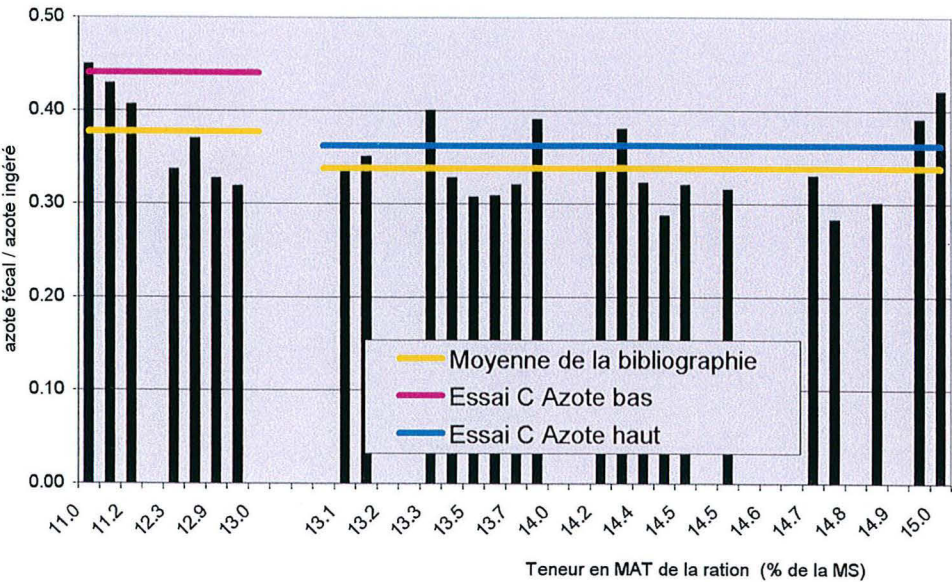
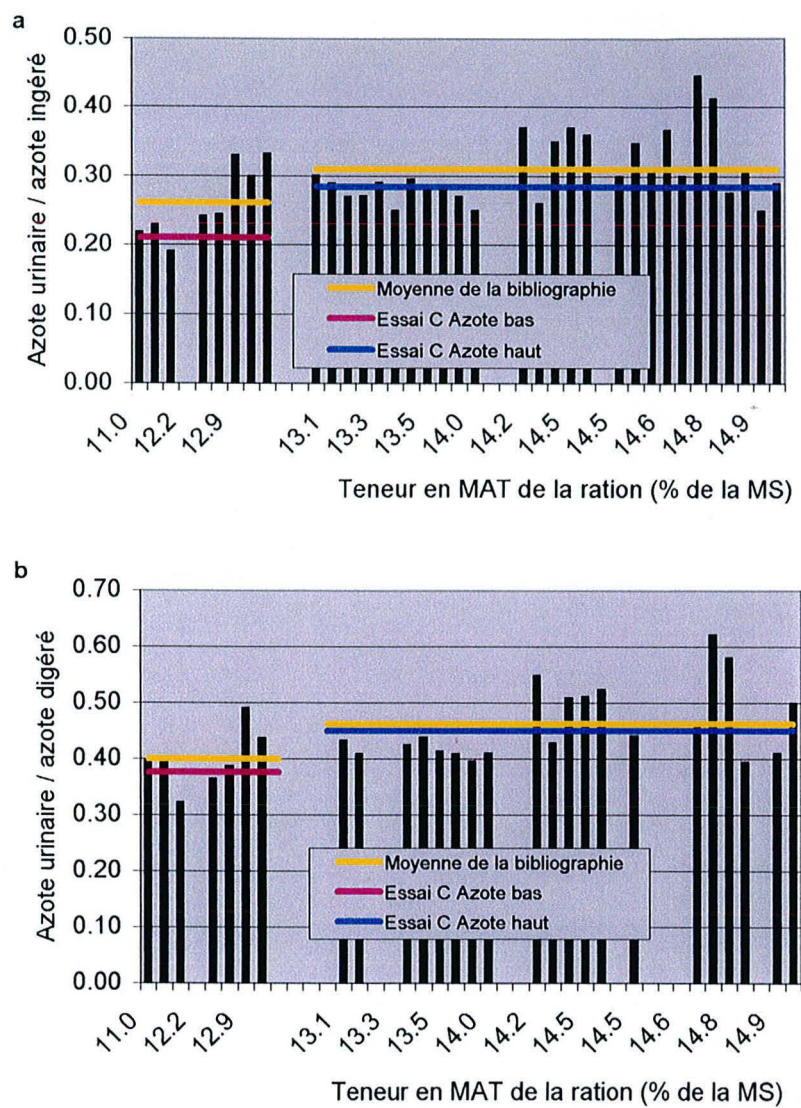


Figure 39 : Comparaison de l'excrétion d'azote dans les fèces de l'azote ingéré de l'expérimentation C avec les données de la bibliographie



Néanmoins, les écarts observés sont faibles et pratiquement inexistantes pour les valeurs d'excrétions urinaires rapportées à l'azote digéré. Parmi les rapports inférieurs à ceux que nous obtenons, les observations de Gonda et Lindberg (1994) et de Gonda *et al.* (1995) sont faites sur des vaches en début de lactation alimentées par une ration riche (11% de la MS) en farine de colza traitée à la chaleur. Pour Volden (1999), la ration avec un niveau bas de protéines (48 g de RUP/kg MS) et de dégradabilité faible (24%) conduit à une excrétion de l'azote digéré inférieure à celles de notre essai. Pour ces auteurs, la dégradation ruminale des sources protéiques est réduite, ce qui permet d'envisager une absorption ruminale d'ammoniac assez modérée et par conséquent une production faible d'azote urinaire. Les rations utilisées par Peyraud *et al.* (1997a) engendrent des quantités d'azote digéré élevées suite à des supplémentations en urée et en caséines (sous forme de caséinate de sodium) associées à des apports élevés en énergie fermentescible (utilisation d'ensilage de maïs comme seul fourrage ainsi que du blé, du maïs grain, de l'orge et de la mélasse). La dégradation ruminale probablement intense des sources azotées de ces rations peut conduire à de l'azote qui pourra être valorisé grâce aux apports d'énergie. Pour l'ensemble de ces auteurs, les conséquences d'une valorisation de l'azote fermentescible par des apports concomitants d'énergie fermentescible, ou des apports en protéines peu dégradables dans le rumen pour diminuer les fuites d'azote sous forme d'ammoniac peuvent être invoquées.

Figure 40: Comparaison de l'excrétion d'azote dans l'urine de l'azote ingéré (a) et de l'azote apparemment digéré (b) de l'expérimentation C avec les données de la bibliographie



IV. Conclusions

Un apport supplémentaire d'énergie à des rations comprenant 12% et 14% MAT, conduit à des quantités croissantes d'azote recueillies dans le lait et l'urine. Cette augmentation du niveau énergétique est accompagnée d'une augmentation de l'ingestion d'azote. L'excrétion fécale reste stationnaire par une digestibilité apparente de l'azote croissante qui compense l'ingestion accrue d'azote. Pour un niveau d'azote donné, les parts d'azote sécrété dans le lait rapportées à l'azote ingéré ou à l'azote apparemment digéré sont similaires pour les deux niveaux énergétiques. Ainsi, l'énergie supplémentaire apportée permet de compenser l'effet de l'augmentation de la quantité d'azote ingéré. Cet effet de l'énergie est également observé pour le rapport entre l'azote urinaire et l'azote ingéré ou l'azote digéré pour les deux niveaux d'azote. Cependant, les rapports entre l'azote uréique de l'urine et l'azote ingéré ou l'azote digéré sont croissants avec les apports énergétiques pour la modalité azote haut. Il semblerait qu'un apport supplémentaire de 0.06 UFL/kg MS ne soit pas suffisant avec une ration à 14% MAT pour que l'effet de l'énergie compense celui de l'ingestion supplémentaire d'azote.

Pour les deux niveaux azotés, l'augmentation du niveau énergétique de la ration est favorable à la limitation des rejets d'azote dans un contexte de maintien de la production laitière et de la production de protéines du lait. Le traitement 12% MAT associé à un apport haut en énergie présente le compromis le plus intéressant.

Les niveaux d'apports azotés et d'apports énergétiques de la ration n'aboutissent pas à des interactions en terme de parts de l'azote produit dans le lait, les fèces et l'urine relatives à l'azote ingéré ou à l'azote digéré.

La présence d'un déficit des apports en azote fermentescible en comparaison des apports en énergie fermentescible constitue un facteur favorisant l'exportation de l'azote dans le lait. Une intensité de recyclage plus forte engendre une amélioration plus marquée de l'exportation de l'azote dans le lait.

Discussion générale

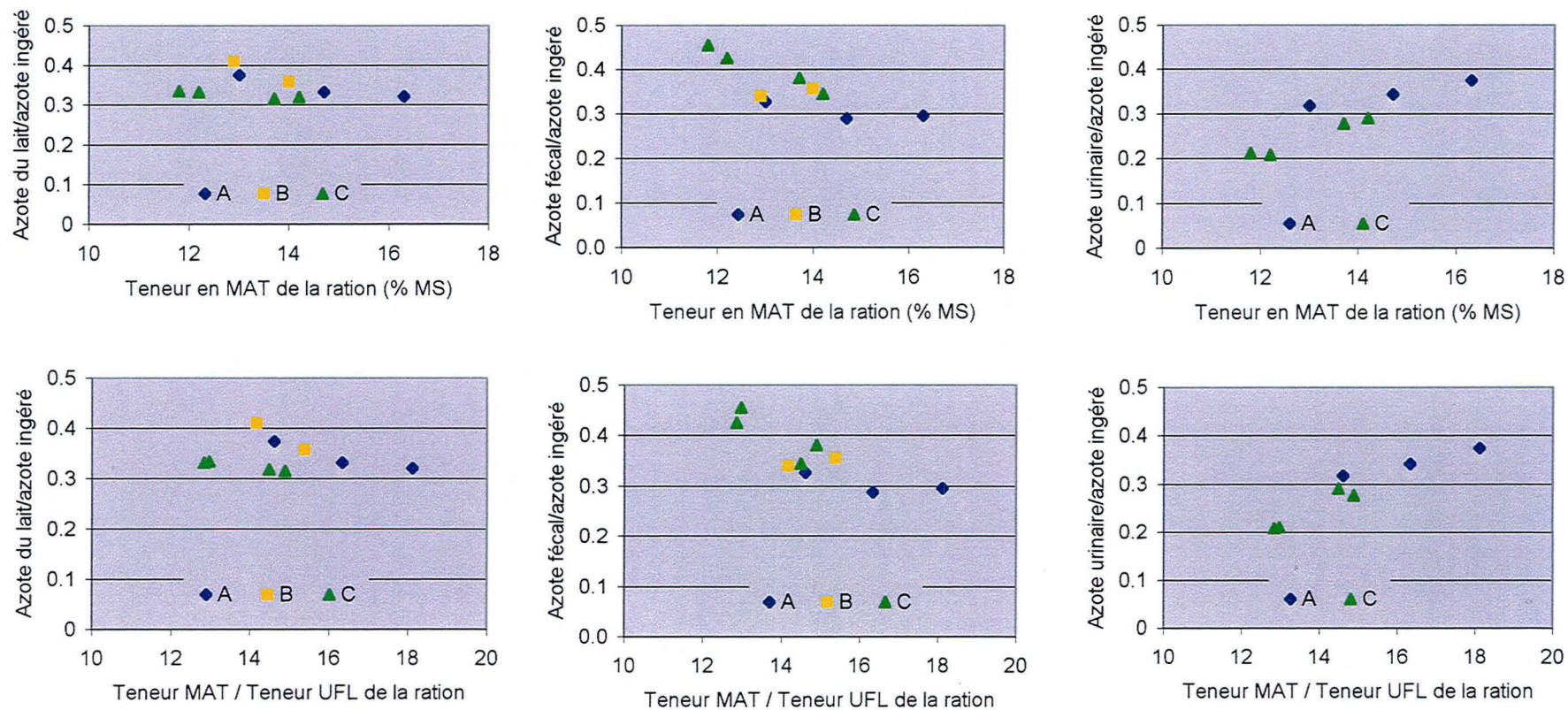
I. Synthèse des expérimentations dans le contexte des données de la bibliographie

Nos travaux ont montré qu'une augmentation de la teneur en MAT de la ration (de 11.8 à 16.3% MAT) était accompagnée d'une augmentation des quantités d'azote ingéré ainsi que des quantités d'azote exportées dans le lait, et excrétées dans les fèces et l'urine. L'impact d'une augmentation de la concentration en MAT de la ration est le plus marqué sur l'ingestion d'azote. Les quantités d'azote recueillies dans l'urine répondent linéairement au niveau azoté de la ration. De plus, les parts de l'azote ingéré ou de l'azote digéré recueillies dans le lait et dans les fèces sont décroissantes lorsque la teneur en MAT de la ration augmente, alors qu'elles sont croissantes pour l'urine. L'évolution du stade de lactation ne conduit pas à des modifications de l'exportation de l'azote ingéré ou digéré dans l'azote du lait. L'effet du stade est similaire pour les deux teneurs en MAT testées. Un apport supplémentaire d'énergie dans la ration pour un niveau fixe d'azote est accompagné d'un accroissement de l'ingestion d'azote et de sa digestibilité apparente. Pour les deux niveaux azotés, la part sécrétée dans le lait de l'azote ingéré ou de l'azote digéré n'est pas affectée par l'énergie. Le niveau haut en énergie permet donc une valorisation dans le lait de l'azote similaire alors que son ingestion est supérieure. Pour un niveau bas d'azote (12% MAT), l'énergie supplémentaire (+0.04 UFL/kg MS) apportée permet de maintenir les proportions de l'azote apporté rejeté dans l'urine. En revanche, pour un niveau plus élevé d'azote (14% MAT), l'énergie apportée en supplément (+0.06 UFL/kg MS) ne permet pas de contrebalancer l'ingestion accrue d'azote car le rapport azote uréique urinaire / azote apporté est croissant. Il est probable que, pour ce niveau azoté, les apports d'énergie soient insuffisants.

L'effet de la teneur en MAT sur les productions d'azote dans le lait, les fèces et l'urine rapportées à l'azote ingéré est globalement similaire pour les trois expérimentations (Figure 41). Même si l'énergie permet d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote, l'expression de ces mêmes variables en fonction du rapport des teneurs en MAT et en UFL de la ration, conduit à des observations similaires. Néanmoins, la réponse à un niveau de MAT donné de la ration peut être modulée par le niveau d'ingestion et donc la quantité d'azote réellement ingéré.

De façon générale, la part de l'azote ingéré recueillie dans le lait est supérieure pour nos essais aux valeurs rapportées par la majorité des travaux de la littérature pour des comparaisons avec une gamme proche de teneurs en MAT de la ration. En revanche, les rapports entre l'excrétion fécale d'azote et l'azote ingéré d'une part, et l'excrétion urinaire d'azote et l'azote ingéré d'autre part, varient par rapport aux données de la bibliographie.

Figure 41: Effets de la teneur en MAT de la ration et du rapport des teneurs en MAT et en UFL de la ration sur les parts de l'azote ingéré recueillies dans le lait, les fèces et l'urine pour les expérimentations A, B et C



L'hypothèse d'un effet du recyclage d'azote optimisé dans nos conditions expérimentales peut être évoquée pour expliquer ces observations. Comme le déficit d'azote fermentescible n'est pas constant entre les différentes rations des trois essais, nous proposons de calculer le recyclage d'azote de la manière suivante (Tableau 50 et Figure 42) :

L'azote recyclé est totalement fermentescible, il est utilisé à 100% par la synthèse des protéines microbiennes dont l'azote est à 80% sous forme d'AA. Les protéines microbiennes subissent la digestion intestinale à hauteur de 80%. Pour combler un déficit d'1 g d'écart entre les apports PDIE et PDIN/kg MS, le recyclage d'azote doit être de 0.25 g.

Il est vraisemblable qu'au moins une partie de cet azote est utilisé pour la synthèse du lait puisque le rapport entre l'azote du lait et l'azote ingéré est systématiquement plus élevé pour nos expérimentations (de 2 à 10 points) que le rapport moyen des données de la littérature pour des gammes proches de teneur en MAT de la ration. La réponse systématique observée suggère soit une fourniture en énergie par la ration permettant une utilisation au moins partielle de l'azote recyclé, soit une utilisation des AA absorbés pour la synthèse d'énergie probablement par un catabolisme hépatique. Mais tout l'azote recyclé n'est sans doute pas utilisé par la mamelle et exporté dans le lait ce qui engendre des rapports azote urinaire / azote ingéré également supérieurs à ceux de la bibliographie. Les régimes qui génèrent des excrétions urinaire de l'azote ingéré les plus proches de la bibliographie sont accompagnés :

- soit d'un recyclage faible (3.5 et 4.5% de l'azote ingéré, Tableau 50)
- soit d'apports énergétiques élevés permettant la valorisation d'une part importante de l'azote recyclé (traitement 12.2% MAT de l'expérimentation C)
- soit d'un recyclage important (12% de l'azote ingéré) avec des apports énergétiques modestes mais dont l'ingestion d'azote est assez faible (traitement 11.8% MAT de l'expérimentation C).

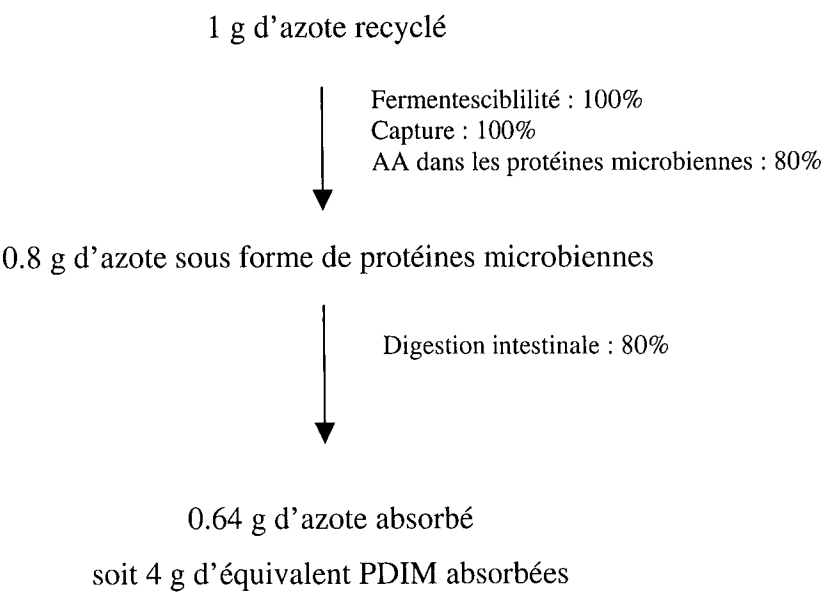
Nos valeurs supérieures à la bibliographie pour le rapport azote du lait / azote ingéré soutiennent l'hypothèse d'un apport supplémentaire d'azote qui n'est pas pris en considération dans l'azote ingéré. Dans ces conditions, une correction prenant en compte la majoration de l'azote ingéré par l'azote recyclé aurait pour conséquence de rapprocher nos résultats de ceux de la littérature. Toutefois, nos mesures de l'azote urinaire rapporté à l'azote ingéré sont similaires à la moyenne de données bibliographiques pour les teneurs basses en MAT alors que pour les teneurs plus élevées elles deviennent supérieures. Il semblerait que le recyclage d'azote sur l'excrétion urinaire d'azote soit bénéfique pour les teneurs azotées

Tableau 50 : Intensité de recyclage des différents régimes appliqués dans les expérimentations A, B et C

Expérimentation	C	C	A	B	B	A	C	C	A
MAT (% MS)	13.7	14.2	16.5	12.9	14.0	14.5	12.2	11.8	13.0
Azote ingéré	447	485	499	383	442	431	403	366	370
UFL (/kg MS)	0.92	0.98	0.90	0.91	0.91	0.90	0.95	0.91	0.89
Déficit en azote fermentescible ^a (g/kg MS)	3	4	8	7	9	10	9	9	11
Recyclage d'azote (% N de la ration)^b	3.5	4.5	7.5	8.5	10.0	11.0	11.5	12.0	13.0
Azote lait/ azote ingéré (%)	31.5	31.8	32.0	41.0	35.7	33.1	33.2	33.4	37.4
Ecart avec la bibliographie ^c	2	2	4	10	6	7	2	2	7
Azote fécal/ azote ingéré (%)	38.0	34.4	29.5	33.9	35.5	28.8	42.5	45.5	32.6
Ecart avec la bibliographie ^c	2	-2	-5	0	2	-5	-1	1	-1
Azote urinaire/ azote ingéré (%)	27.7	29.0	37.4			34.2	20.8	21.1	31.7
Ecart avec la bibliographie ^c	0	1	3			2	0	0	3

^a par rapport à l'énergie fermentescible soit PDIE – PDIN
^b recyclage = (déficit en azote fermentescible / 0.64) / MAT (en g/kg)
^c écart = données expérimentales – données bibliographiques

Figure 42 : Recyclage d’azote dans une situation de déficit d’azote fermentescible par rapport à l’énergie fermentescible de la ration



modérées. Pour des teneurs plus élevées, il est probable que les apports azotés sont tels qu'un recyclage d'azote ne permette pas de réduire l'excrétion.

Avec l'application d'un raisonnement similaire, l'excrétion fécale d'azote devrait être augmentée par l'azote des protéines microbiennes supplémentaires, synthétisées à partir de l'azote recyclé au niveau du rumen, mais non digérées (20%) dans l'intestin. Ainsi les rapports entre l'azote fécal et l'azote ingéré devraient être supérieurs à ceux de la bibliographie. Or ce résultat n'est pas retrouvé dans nos essais puisque nos rapports sont fréquemment inférieurs. Les écarts les plus importants sont obtenus pour les traitements 14.5 et 16.0% MAT de l'expérimentation A, dans laquelle les digestibilités apparentes d'azote mesurées sont les plus élevées. L'azote endogène constitue une part prépondérante dans l'excrétion fécale d'azote. Il peut être envisagé que ce paramètre est moins sensible aux variations de recyclage par un effet tampon de l'azote endogène.

Une autre hypothèse d'une meilleure exportation dans le lait de l'azote ingéré avec des conditions de déficit des apports en azote fermentescible par rapport à l'énergie fermentescible, pourrait être appuyée par le fait que nos régimes sont distribués en ration complète ce qui est reconnu pour induire une augmentation d'ingestion. Ainsi pour un même niveau de MAT dans la ration, les ingestions que nous mesurons sont fréquemment supérieures à celles de la bibliographie. Comme nous l'avons vu dans la synthèse bibliographique, cet effet devrait être accompagné d'une diminution de l'exportation dans le lait de l'azote ingéré ; or nos valeurs sont systématiquement supérieures à celles de la littérature. L'hypothèse d'une meilleure exportation de l'azote dans le lait en présence d'un recyclage d'azote est donc renforcée. Cette hypothèse s'accorde avec le fait que les auteurs qui observent des exportations dans le lait de l'azote alimentaire plus élevées ou des excréments dans les fèces et l'urine de l'azote ingéré plus faibles travaillent très fréquemment en condition de déficit des apports en azote fermentescible en comparaison des apports en énergie fermentescible.

Dans un système de contraintes privilégiant la limitation des rejets d'azote dans l'environnement mais également le maintien de la production laitière et de la production de protéines du lait, un apport d'énergie est favorable. Parmi l'ensemble des traitements étudiés, la ration 13% MAT conduit au rapport entre l'azote excrété dans les fèces et l'urine et l'azote protéique du lait le plus faible alors que la production laitière est satisfaisante (Tableau 51). Ce régime génère par conséquent le compromis le plus intéressant et ce malgré son niveau énergétique le plus faible. Il est à noter que cette ration est celle qui présente l'intensité de

Tableau 51 : Comparaisons des différents traitements en terme de compromis

Expérimentation	C	C	A	C	C	A	A
MAT (% de la MS)	11,8	12,2	13,0	13,7	14,2	14,5	16,3
UFL (/kg de MS)	0,91	0,95	0,89	0,92	0,98	0,90	0,90
N excrété / N produit ¹	2,09	1,98	1,82	2,15	2,08	2,00	2,21
Production (kg/j)	23,5	24,7	30,7	26,1	26,6	30,8	32,7
N fécal (g/j)	166	171	121	167	167	123	145
N urinaire (g/j)	77	83	117	123	141	147	185
N lait (g/j)	116	128	131	135	148	135	149
N ingéré (g/j)	366	403	370	447	485	431	499

¹ (N excrété = g d'N urinaire + g d'N fécal) / (N produit = g d'N protéique du lait)

recyclage la plus forte, ce qui appuie l'intérêt d'un déficit en azote fermentescible de la ration. Néanmoins, un effet de la nature des aliments composant cette ration ne peut pas être exclu dans une démarche de comparaison de plusieurs essais.

II. Modélisation de la distribution de l'azote alimentaire entre le lait, les fèces et l'urine

A partir des données bibliographiques nous avons établi des équations de prédiction des trois voies de sortie de l'azote :

$$N \text{ fécal (g/j)} = 83 - 3.12 \times \text{MAT de la ration (\%)} + 0.24 \times N \text{ ingéré (g/j)}$$

(moyenne = 139 g/j ; $r^2 = 0.60$; ETR = 15 ; n = 77)

$$N \text{ urinaire (g/j)} = -166 + 11.6 \times \text{MAT de la ration (\%)} + 0.3 \times N \text{ ingéré (g/j)}$$

(moyenne = 154 g/j ; $r^2 = 0.84$; ETR = 37 ; n = 88)

$$N \text{ lait (g/j)} = 86 - 6.1 \times \text{MAT de la ration (\%)} + 0.3 \times N \text{ ingéré (g/j)}$$

(moyenne = 126 g/j ; $r^2 = 0.70$; ETR = 14 ; n = 94)

Puis nous avons comparé les prédictions des quantités d'azote recueilli dans les compartiments lait, urine et fèces obtenues avec ces équations avec les quantités mesurées lors de nos essais (Figure 43). La majorité des données, que nous avons obtenue, se situent dans l'intervalle de confiance du modèle défini. Pour les valeurs se trouvant à la limite de l'intervalle, un test de comparaison de variance montre que la variance de la prédiction et des valeurs mesurées ne sont pas statistiquement différentes. Ainsi, le modèle établi à partir des données bibliographiques est validé par nos données (9 traitements). Les équations établies sont donc applicables à nos conditions expérimentales, ce qui confirme l'impact de la teneur en MAT de la ration et la quantité d'azote ingéré comme variables explicatives des équations de prédiction. L'équation de prédiction de l'excrétion urinaire d'azote est celle qui présente le taux d'incertitude (ETR = 37 g/j) le plus élevé. Cependant, les valeurs des expérimentations A et C sont très proches de la prédiction du modèle. Elle s'applique donc parfaitement à nos conditions expérimentales.

Pour conforter l'intérêt du modèle établi à partir de notre synthèse bibliographique par rapport à ceux publiés, une comparaison des prédictions établies à partir des différents modèles est réalisée (Tableau 52). Pour la sécrétion d'azote dans le lait, les équations de Spanghero et Kowalski (1997) sous-estiment les mesures dans nos essais (-44% en moyenne).

Figure 43: Comparaisons des données des expérimentations A, B et C avec les prédictions des quantités d'azote produites dans le lait (a), les fèces (b) et l'urine (c) du modèle établi à partir de la bibliographie

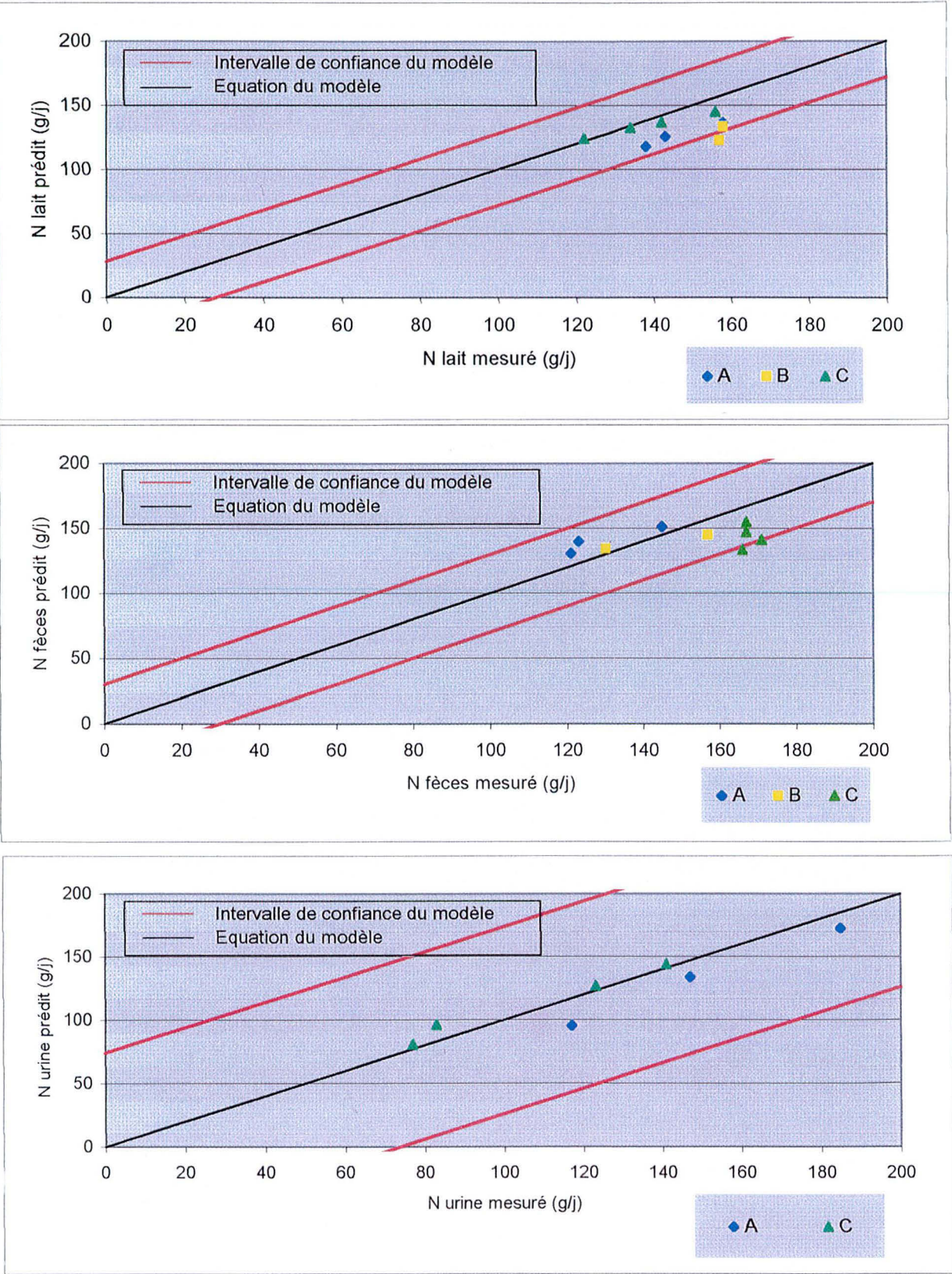


Tableau 52: Comparaisons des prédictions des quantités d'azote produites dans le lait, les fèces et l'urine par les modèles publiés avec les mesures des expérimentations A, B et C

N l a i t	Expérimentation	MAT % MS	UFL /kg MS	N lait mesuré g/j	Synthèse bibliographique	Spanghero et Kowalski 1997
	A	13,0	0,89	138	118	69
	A	14,7	0,90	143	126	80
	A	16,3	0,90	158	137	93
	B	12,9	0,91	157	123	71
	B	14,0	0,91	158	134	83
	C	11,8	0,91	122	124	68
	C	12,2	0,95	134	133	75
	C	13,7	0,92	142	137	83
	C	14,2	0,98	156	145	91

N f è c e s	Expérimentation	MAT % MS	UFL /kg MS	N fèces mesuré g/j	Synthèse bibliographique	Jonker <i>et al.</i> 1998	Wilkerson <i>et al.</i> 1997
	A	13,0	0,89	121	131	197	183
	A	14,7	0,90	123	140	207	183
	A	16,3	0,90	145	152	228	191
	B	12,9	0,91	130	134	189	141
	B	14,0	0,91	157	145	212	152
	C	11,8	0,91	166	134	163	122
	C	12,2	0,95	171	141	165	115
	C	13,7	0,92	167	147	178	134
	C	14,2	0,98	167	155	181	126

N u r i n e	Expérimentation	MAT % MS	UFL /kg MS	N urine mesuré g/j	Synthèse bibliographique	Spanghero et Kowalski 1997	Jonker <i>et al.</i> 1998	Wilkerson <i>et al.</i> 1997	Kauffman et St-Pierre 2001
	A	13,0	0,89	117	96	170	252	125	327
	A	14,7	0,90	147	134	199	298	152	388
	A	16,3	0,90	185	173	231	382	182	497
	C	11,8	0,91	77	81	168	102	58	138
	C	12,2	0,95	83	96	186	103	55	139
	C	13,7	0,92	123	127	207	157	96	212
	C	14,2	0,98	141	144	224	158	94	214

L'excrétion urinaire est largement sur-estimée par le modèle de Spanghero et Kowalski (1997) (+68%), par celui de Kauffman et St-Pierre (2001) (+112%) et pour les valeurs faibles (expérimentation A) par le modèle de Jonker *et al.* (1998) (+108%). Un élément d'explication de la différence de Jonker *et al.* (1998) pourrait être que le TUL (variable utilisée pour la prédiction) obtenu lors de cet essai est particulièrement élevé alors que l'excrétion urinaire ne l'est pas. Pour l'expérimentation C, les prédictions de ce modèle sont d'une précision intermédiaire (+24%). Les valeurs d'excrétion urinaire, obtenues par différence entre l'azote total excrété et l'azote fécal à partir du modèle de Wilkerson *et al.* (1997), sont inférieures aux nôtres (-15%). Le modèle de Jonker *et al.* (1998) sur-estime l'excrétion fécale d'azote (+63%) obtenues lors des expérimentations A et B. Pour l'expérimentation C, les prédictions de ce modèle sont très proches de nos mesures d'azote fécal (+2%). Le modèle de Wilkerson *et al.* (1997) indique des excrétions fécales d'azote supérieures aux nôtres (+44%) pour les valeurs faibles de l'expérimentation A et inférieures (-74%) pour les valeurs plus élevées de l'expérimentation C, les prédictions établies pour l'expérimentation B étant proches des mesures.

Il apparaît donc que les modèles de prédiction des quantités d'azote produit dans le lait, les fèces ou l'urine publiés ne sont pas adaptés pour nos conditions expérimentales. En revanche le modèle établi à partir des données bibliographiques permet de très bonnes prédictions des sécrétions d'azote dans le lait (-10%) et des excrétions d'azote dans les fèces (-4%) et dans l'urine (-1%), avec des écarts entre les valeurs théoriques et celles observées qui restent dans l'intervalle de confiance. De plus, le modèle établi permet d'envisager une modulation (pour la teneur en MAT de la ration) ou une limitation (pour la quantité d'azote ingéré) des variables explicatives des équations de prédiction dans le but d'un contrôle des quantités produites dans les trois compartiments de sortie. Les écarts de la sécrétion d'azote dans le lait entre nos mesures et les prédictions par le modèle de la bibliographie sont vraisemblablement dus au recyclage d'azote qui engendre une quantité supérieure d'AA absorbés et donc potentiellement valorisés dans le lait. L'effet du recyclage sur les excrétions fécale et urinaire d'azote est moins marqué sans doute par le fait que les excrétions d'azote sont diminuées par le recyclage et qu'une part de l'azote recyclé est à nouveau excrété par ces voies. Il pourrait être envisagé de prendre en considération la quantité d'azote recyclée pour améliorer les prédictions des productions d'azote dans les trois compartiments de sortie. Les données obtenues dans nos expérimentations ne sont pas assez nombreuses pour mettre en place une

correction ; cependant l'ensemble des éléments disponibles à partir des données bibliographiques va dans le sens de cette hypothèse.

Conclusions générales et perspectives

L'ensemble des travaux menés démontre qu'une augmentation du niveau de MAT de la ration est accompagnée d'une augmentation de l'ingestion d'azote ainsi que les quantités d'azote apparemment digéré et les quantités recueillies dans le lait, les fèces et l'urine. La sensibilité de la réponse des rejets sous forme d'urée souligne le rôle de l'excrétion urinaire dans l'élimination de l'azote excédentaire. La distribution de l'azote ingéré dans le lait et les fèces diminue lorsque les apports azotés augmentent alors que le rapport entre l'excrétion urinaire d'azote et l'ingestion d'azote s'élève. La distribution de l'azote digéré entre le lait et l'urine suit les mêmes tendances. L'effet du stade de lactation sur la répartition de l'azote entre les trois voies de sortie n'est pas particulièrement marqué dans nos conditions expérimentales et ne modifie pas la réponse à la teneur en MAT de la ration. Le niveau d'ingestion est davantage impliqué dans la détermination de la partition de l'azote. L'utilisation de régimes distribués sous forme de ration complète peut constituer un facteur d'atténuation des variations d'ingestion et de production. Un niveau de production élevé pourrait alors générer des différences plus importantes de la distribution de l'azote entre les trois compartiments. Une supplémentation en énergie conduit à une augmentation de l'ingestion d'azote, et de sa digestibilité apparente. Un maintien de la part relative de l'azote ingéré ou de l'azote digéré sécrétée dans le lait est observé en dépit de l'augmentation de l'ingestion d'azote. Lorsque le niveau d'azote est bas (12% MAT), les apports d'énergie engendrent un maintien du rapport entre l'azote urinaire (total et uréique) et l'azote apporté. Pour une teneur plus élevée en MAT (14%), les parts d'azote total recueillies dans l'urine ne varient pas avec l'apport supplémentaire d'énergie alors que celles de l'azote uréique sont plus élevées pour le régime le plus riche en énergie. Il est possible que ce niveau énergétique associé à la ration 14% MAT est insuffisant pour permettre une distribution similaire à celle observée pour un niveau inférieur d'ingestion d'azote.

Un déficit de la ration en azote fermentescible en comparaison aux apports en énergie fermentescible permet une exportation dans le lait de l'azote ingéré ou de l'azote digéré systématiquement supérieure à celles obtenues dans la littérature en condition d'équilibre. Les rations qui génèrent l'intensité de recyclage la plus forte, conduisent aux valorisations dans le lait les plus élevées, si l'énergie nécessaire à l'exportation de l'azote recyclé est apportée simultanément. Ce gain d'azote via le recyclage a un impact moins marqué sur la répartition de l'azote entre les fèces et l'urine.

L'apport supplémentaire d'énergie, pour un niveau fixe d'azote, est bénéfique en terme de compromis entre l'azote valorisé dans le lait sous forme de protéines d'une part, l'azote

excrété dans les fèces et l'urine d'autre part, et la production laitière. Ce compromis étant défini dans un système de contraintes privilégiant la limitation des rejets d'azote dans l'environnement tout en maintenant la production laitière et la production de protéines du lait. La ration à 13% MAT conduit au compromis le plus intéressant. Ce traitement à des apports relativement faibles en énergie (0.89 UFL/kg MS) mais il présente l'intensité la plus importante de recyclage d'azote (13%). La mise en place systématique d'un déficit d'azote fermentescible par rapport à l'énergie fermentescible de la ration semble être un paramètre clef pour améliorer l'exportation de l'azote ingéré ou digéré dans le lait, même si la présence de ce déficit n'est que théorique et se base sur de nombreuses estimations propres au système PDI comme la digestibilité, la vitesse de transit ou encore l'efficacité de captation et de conversion par les micro-organismes du rumen. L'effet obtenu sur l'exportation d'azote dans le lait peut évoluer selon l'intensité de recyclage d'azote généré. Ainsi, il serait intéressant d'approfondir cet aspect par des études travaillant avec des gammes de déficit plus étendues. Des mesures plus précises du recyclage permettront d'appuyer davantage cette hypothèse.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- AFRC** (1992). Nutritive requirements of ruminant animals/ Protein. AFRC Technical committee on responses to nutrients, report n°9, *Nutr. Abs. & Rev.*, Series B, 62, 787-835.
- AFRC** (1993). Energy and protein requirements of ruminants. An advisory manual proposed by AFRC Technical committee on responses to nutrients. *CAB International, Wollingford, UK*, 159p.
- Al-Dehneh A., Huber J.T., Wanderley R., Theurer C.B., Pessarakli M., DeYoung D.** (1997). Incorporation of recycled urea-N into ruminal bacteria flowing to the small intestine of dairy cows fed a high-grain or high-forage diet. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 68 327-338.
- Aldrich, J.M., L. D. Muller, G. A. Varga and L. C. Griel.** (1993). Nonstructural carbohydrate and protein effects on rumen fermentation, nutrient flow, and performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 76, 1091-1105.
- Alpers D.H.** (1983). Protein synthesis and turnover in the mammalian intestine, In: *Protein Metabolism and Nutrition* (M. Arnal/R. Pion/D. Bonin, eds), *INRA, Paris, FR, I*, 311p.
- Andrieu J., Demarquilly C., Wegat-Litré E.** (1981). Tables de prévision de la valeur alimentaire des fourrages. In: *Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants*, *INRA, Paris*, 345-578.
- Andrieu J., Demarquilly C.** (1987). Valeur nutritive des fourrages: tables et prévision. *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix, I.N.R.A.*, 70, 61-73.
- Aschaffenburg R., Drewry J.** (1959). New procedure for the routine determination of the various non casein proteins of milk. *C.R. XVè Cong. Intern. Lait.*, 3, Sect. 5, 1631-1637.
- Aufrère J., Graviou D., Demarquilly C., Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P.** (1989). Aliments concentrés pour ruminants : prévision de la valeur azotée PDI à partir d'une méthode enzymatique standardisée. *INRA Prod. Anim.*, 2, 249-254.
- Belyea R.L., Adams M.W.** (1990). Energy and nitrogen utilization of high versus low producing dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 73, 1023-1030.
- Bequette B.J., Metcalf J.A.Wray-Cahen. D., Backwell F.R.C., Sutton J.D., Lomax M.A., Macrae J.C., Lobley G.E.** (1996). Leucine and protein metabolism in the lactating dairy cows mammary gland: response to supplemental dietary crude protein intake. *J. Dairy Res.*, 63, 209-222.
- Berry N.R., Jewell P.L., Sutter F., Edwards P.J., Kreuzer M.** (2001). Effect of concentrate on nitrogen turnover and excretion of P, K, Na, Ca and Mg in lactating cows rotationally grazed at high altitude. *Livest. Prod. Sci.*, 71, 261-275.
- Bertrand J.A., Pardue F.E., Jenkins T.C.** (1998). Effect of ruminally protected amino acids on milk yield and composition of Jersey cows fed whole cottonseed. *J. Dairy Sci.*, 81, 2215-2220.
- Blaxter K.L., Graham Mc C., Wainman F.W.** (1956). Some observations on the digestibility of food by sheep, and on related problems. *Br. J. Nutr.*, 10, 65-91.
- Brock F.M., Forsberg C.W., Buchanan-Smith J.G.** (1982). Proteolytic activity of rumen micro-organisms and effects of proteinase inhibitors. *Appl. Envir. Microbiol.*, 44, 561-569.
- Casper D.P., Schingoethe D.J.** (1989). Model to describe and alleviate milk protein depression in early lactation dairy cows fed a high fat diet. *J. Dairy Sci.*, 72, 327-3335.
- Castillo A.R., Kebreab E., Beever D.E., Barbi J.H., Sutton J.D., Kirby H.C., France J.** (2001a). The effect of energy supplementation on nitrogen utilization in lactating dairy cows fed grass silage diets. *J. Anim. Sci.*, 79, 240-246.

- Castillo A.R., Kebreab E., Beever D.E., Barbi J.H., Sutton J.D., Kirby H.C., France J.** (2001b). The effect of protein supplementation on nitrogen utilization in lactating dairy cows fed grass silage diets. *J. Anim. Sci.*, 79, 247-253.
- Choung J.J., Chamberlain D.G.** (1992). Effects of abomasal infusions of sodium caseinate, soya-protein isolate and a water extract of fish meal on the utilisation of nitrogen by dairy cows. *J. Sci. Food Agric.*, 60, 131-133.
- Clark J.H., Spires H.R., Davis C.L.** (1978). Uptake and metabolism of nitrogenous components by the lactating mammary gland. *Fed. Proc.*, 37, 1233-1237
- Colin-Schoellen O., Laurent F., Vignon B., Robert J.-C., Sloan B.** (1995). Interactions of ruminally protected methionine and lysine with protein source or energy level in the diets of cows. *J. Dairy Sci.*, 78, 2807-2818.
- Colin-Schoellen O., Jurjanz S., Laurent F.** (2000). Metabolizable protein supply (PDIE) and restrited level of ruminally degradable nitrogen (PDIN) in total mixed rations: effect on milk production and composition and on nitrogen utilization by dairy cows. *Livest. Prod.*, 67, 41-53.
- Cunningham K.D., Cecava M.J., Johnson T.R., Ludden P.A.** (1996). Influence of source and amount of dietary protein in milk yield by cows in early lactation. *J. Dairy Sci.*, 76, 620-630.
- CVB** (1990). Voorlopinge nieuw eiwitwaarderings system voor herkauwers (melkvee). DVE systeem. *CVB reeks N°6, produkshop voor veevoeder*, 38p.
- Debroas D.** (1992). Activité protéolytique des bactéries du rumen. Etude de l'hydrolyse des parois végétales. Thèse INPL, France.
- Debroas D., Blanchart G.** (1993). Interaction between proteolytic and cellulolytic rumen bacteria during hydrolysis of plant cell wall protein. *Reprod. Nutr. Dev.*, 33, 283-288.
- Demarquilly C., Chenost M., Giger S.** (1995). Pertes fécales et digestibilité des aliments et des rations. In: *Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion*. Jarrige R., Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.H. Farce, M. Journet. Ed. INRA., 601-647.
- Demigné C., Yacoub C., Morand C., Rémésy C.** (1991). Interaction between propionate and amino acid metabolism in isolated sheep hepatocytes. *Br. J. Nutr.*, 65, 301-317.
- Dewhurst R.J., Davies D.R., Merry R.J.** (2000). Microbial protein supply from the rumen. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 85, 1-21.
- Dhiman T.R., Satter L.D.** (1997). Yield response of dairy cows fed different proportions of Alfalfa silage and corn silage. *J. Dairy Sci.*, 80, 2069-2082.
- Dinn N.E., Shelford J.A., Fisher L.J.** (1998). Use of the cornell net carbohydrate and protein system and rumen-protected lysine and methionine to reduce nitrogen excretion from lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 81, 229-237.
- Dixon R.M., Nolan J.V.** (1982). Studies of the large intestine of sheep. 1. Fermentation and absorption in sections of the large intestine. *Brit. J. Nutr.*, 47, 289-300.
- Doreau M., Grimaud P., Michalet-Doreau B.** (2000). La sous-alimentation chez les ruminants : ses effets sur la digestion. *INRA Prod. Anim.*, 13, 247-255.
- Dulphy J.-P., Balch C.C., Doreau M.** (1995). Adaptation des espèces domestiques à la digestion des aliments lignocellulosiques. In: *Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion*. Jarrige R., Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.H. Farce, M. Journet. Ed. INRA., 759-803.
- Faichney G.J.** (1995). Transit des digesta dans le tube digestif des ruminants. In: C. Demarquilly (ed), *Les fourrages secs : récoltes, traitement, utilisation*, INRA Editions, Paris, 431-464.
- Faverdin Ph., Hoden A., Coulon J.B.** (1987). Recommandations alimentaires pour les vaches laitières. *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix, INRA*, 70, 133-157.

- Fisher L.J., Dinn N.E., Shelford D.A., Paul J.W.** (2000). The effect of concentration and form of dietary nitrogen on the utilization and excretion of nitrogen by lactating dairy cows. *Can J. Anim. Sci.*, 80, 207-209.
- Frank B., Gustafsson G., Persson M.** (2002). Feeding dairy cows for decreased ammonia emission. *Livest. Prod.*, 171-179.
- Giráldez F.J., Valdés C., Peláez R., Frutos P., Mantecón A.R.** (1997). The influence of digestible organic matter and nitrogen intake on faecal and urinary nitrogen in sheep. *Lives. Prod. Sci.*, 51, 183-190.
- Gonda H.L., Lindberg J.E., Bertilsson J.** (1995). Effect of level and degradability of rapeseed meal in rations for dairy cows. 2. Diet digestibility, dietary nitrogen partition and urinary purine derivatives excretion. *Acta. Agric. Scand. Sect. A, Animal Sci.*, 45, 36-44.
- Gonda H.L., Lindberg J.E.** (1994). Evaluation of dietary nitrogen utilization in dairy cows based on urea concentrations in blood, urine and milk, and on urinary concentration of purine derivatives. *Acta Agric. Scand. Sect. A, Animal Sci.*, 44, 236-245.
- Guder W.G., Haussinger D., Gerok W.** (1987). Renal and hepatic nitrogen metabolism in systemic acid base regulation. *J. Clin. Chem. Clin. Biochem.*, 25, 457-466.
- Guilloteau P., Le Huêrou-Luron I., Malbert C.H., Toullec R.** (1995). Les sécrétions digestives et leur régulation. In: Jarrige, R., Ruckebusch, Y., Demarquilly, C., Farce, M.H., Journet, M. (eds.) *Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion*. INRA. Paris, 489-526.
- Guinard J., Rulquin H.** (1994a). Effects of graded amounts of duodenal infusions of lysine on the mammary uptake of major milk precursors in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 77, 3565-3576.
- Guinard J., Rulquin H.** (1994b). Effects of graded levels of duodenal infusions of casein on mammary uptake in lactating cows. 2. Individual amino acids. *J. Dairy Sci.*, 77, 3304-3315.
- Gustafsson A.H., Palmquist D.L.** (1993). Diurnal variation of rumen ammonia, serum urea, and milk urea in dairy cows at high and low yields. *J. Dairy Sci.*, 76, 475-484.
- Ha J.K., Kennelly J.J.** (1984). Effect of protein on nutrient digestion and milk production by Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, 67, 2302-2307.
- Hale E.B., Duncan C.W., Huffman C.F.** (1947). Rumen digestion studies. 1. A method of investigating chemical changes in the rumen. 2. Studies in the chemistry of rumen digestion. *J. Nutr.*, 34, 733-745 et 747-758.
- Haussinger D., Gerok W., Sies H.** (1985). Hepatic role in pH regulation: Role of the intercellular glutamine cycle. In: *Metabolic Regulation*, Eds R.S. Ochs, R. W. Hanson and J. Hall., Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 186-189.
- Herrera-Saldana R., Hubert J.T.** (1989). Influence of varying protein and starch degradabilities on performances of lactating cows. *J. Dairy Sci.*, 72, 1477-1483.
- Hoover W.H.** (1978). Digestion and absorption in the hindgut of ruminants. *J. Anim. Sci.*, 46, 1789-1798.
- Houpt T.R., Houpt K.A.** (1968). Transfer of urea nitrogen across the rumen wall. *Am. J. Physiol.*, 214, 1296-1303.
- Huntington G.B., Archibeque S.L.** (1999). Practical aspects of urea and ammonia metabolism in ruminants. *Proceedings of the American Society of Animal Science*, 1-11.
- Jarrige R.** (1988). Alimentation des bovins, ovins et caprins. *Ed. INRA, France*, 471p.
- Jenness R., Sloan R.E.** (1970). The composition of milks of various species: a review. *Dairy Science Abs.*, 32, 599-612.
- Jonker J.S., Kohn R.A., Erdman R.A.** (1998). Using milk urea nitrogen to predict nitrogen excretion and utilization efficiency in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 81, 2681-2692.

- Jouany J.P., Broudiscou L., Prins R.A., Komisarczuck-Bony S.** (1995). Métabolisme et nutrition de la population microbienne du rumen. In: *Jarrige, J., Ruckebusch, Y., Demarquilly, C., Farce, M.H., Journet, M. (eds.) Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion. INRA. Paris*, 349-381.
- Jurjanz S., Monteils V., Ben Romdhane M.A.** (2002). Fiabilité d'une estimation simplifiée de la matière sèche fécale chez la vache en lactation. *9^{ème} Renc. Rech. Rum.* 4-5 décembre 2002, sous presse.
- Kauffman A.J., St-Pierre N.R.** (2001). The relationship of milk urea nitrogen to urine nitrogen excretion in Holstein and Jersey cows. *J. Dairy Sci.*, 84, 2284-2294.
- Kebreab E., Castillo A.R., Beever D.E., Humphries D.J., France J.** (2000). Effects of management practices prior to and during ensiling and concentrate type on nitrogen utilization in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 83, 1274-1285.
- Kebreab E., France J., Mills J.A.N., Allison R., Dijkstra J.** (2002). A dynamic model of N metabolism in the lactating dairy cow and an assessment of impact of N excretion on the environment. *J. Anim. Sci.*, 80, 248-259.
- Kik M.J., Huisman J., Van der Poel A.F., Mouwen J.M.** (1990). Pathologic changes of the small intestinal mucosa of pigs after feeding *Phaseolus vulgaris* beans. *Vet. Pathol.*, 27 (5) 329-334.
- Kim K.H., Choung J.J., Chamberlain D.G.** (1999a). Effects of varying degrees of synchrony of energy and nitrogen release in the rumen on the synthesis of microbial protein in cattle consuming a diet of grass silage and cereal-based concentrate. *J. Sci. Food Agric.*, 79, 1441-1447.
- Kim K.H., Oh Y.G., Choung J.J., Chamberlain D.G.** (1999b). Effects of varying degrees of synchrony of energy and nitrogen release in the rumen on the synthesis of microbial protein in cattle consuming grass silage. *J. Sci. Food Agric.*, 79, 833-838.
- Kohn R.A., Kalscheur K.F., Russek-Cohen E.** (2002). Evaluation of models to estimate urinary nitrogen and expected milk urea nitrogen. *J. Dairy Sci.*, 85, 227-233.
- Lapierre H., Lobley G.E.** (2001). Nitrogen recycling in the ruminant: A review. *J. Dairy Sci.*, 84 (E. Suppl.) E223-E236.
- Linzell J.L., Mepham T.B.** (1968). Mammary synthesis of amino acids in the lactating goat. *Biochem. J.*, 107, 18-21.
- Littell R.C., Milliken G.A., Stroup W.W., Wolfinger R. D.** (1996). SAS-system for mixed models. *SAS institute Inc., Cary, NC, USA*, 633p.
- Lobley G.E.** (1992). Control of the metabolic fate of amino acids in ruminants: a review. *J. Anim. Sci.*, 70, 3264-3275.
- Lobley G.E., Connell A., Lomax M.A., Brown D.S., Milne E., Calder A.G., Farningham D.A.H.** (1995). Hepatic detoxification of ammonia in the ovine liver: possible consequences for amino acid catabolism. *Br. J. Nutr.*, 73, 667-685.
- Lomax M.A., Baird G.D.** (1983). Blood flow and nutrient exchange across the liver and gut of the dairy cow. Effect of lactating and fasting. *Br. J. Nutr.*, 49, 481-496.
- Lucas H.L.** (1962). Some theoretical aspects of estimating forage quality. *Meeting Am. Soc. Agron. Ithaca (N.Y.) Nimeo Rep., North Carolina State Coll.*, 46p.
- Maas J.A., France J., Dijkstra J., Bannink A., McBride B.W.** (1998). Application of a mechanistic model to study competitive inhibition of amino acid uptake by the lactating bovine mammary gland. *J. Dairy Sci.*, 81, 1724-1734.
- Maas J.A., France J., McBride B.W.** (1997). Model of milk protein synthesis. A mechanistic model of milk protein synthesis in the lactating bovine mammary gland. *Theor. Biol.*, 187, 363-378.

- Mabjeesh S.J., Bruckental I., Arieli A.** (1999). Heat-treated whole cottonseed: effect of dietary protein concentration on the performance and amino acid utilization by the mammary gland of dairy cows. *J. Dairy Res.*, 66, 9-22.
- Mackle T.R., Dwyer D.A., Ingvarsten K.L., Chouinard P.Y., Ross D.A., Bauman D.E.** (2000). Evaluation of whole blood and plasma in the interorgan supply of free amino acids for the mammary gland of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 83, 1300-1309.
- Madson J.** (1985). The basis for the Nordic protein evaluation system for ruminants. The AAT/PBV system. *Acta Agric. Scand. Suppl.*, 25, 9-20.
- Maiga H.A., Schingoethe D.J.** (1997). Optimizing the utilization of animal fat and ruminal bypass proteins in the diets of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 80, 343-352.
- Mason V.C.** (1969). Some observations on the distribution and origin of nitrogen in sheep faeces. *J. Agric. Sci. (Camb.)*, 73, 99-111.
- Mayes R.W., Lamb C.S., Colgrove P.M.** (1986). The use of dosed and herbage *n*-alkanes as markers for determination of herbage intake. *J. Agric. Sci.*, 107, 161-170.
- McCarthy R.D., Klusmeyer T. H., Vicini J. L., Clark J. H., Nelson D. R.** (1989). Effects of source of protein and carbohydrate on ruminal fermentation and passage of nutrients to the small intestine of lactating cows. *J. Dairy Sci.*, 72, 2002 - 2016.
- Metcalf J.A., Beever D.E., Sutton J.D., Wray-Cahen D., Evans R.T., Humphries D.J., Backwell F.R.C., Bequette B.J., MacRae J.C.** (1994). The effect of supplementation protein on in vivo metabolism of the mammary gland in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 77, 1816-1827.
- Metcalf J.A., Wray-Cahen D., Chettle E.E., Sutton J.D., Beever D.E., Crompton L.A., MacRae J.C., Bequette B.J., Backwell F.R.C.** (1996). The effect of dietary crude protein as protected soybean meal on mammary metabolism in the lactating dairy cow. *J. Dairy Sci.*, 79, 603-611.
- Michalet-Doreau B., Vérité R., Chapoutot P.** (1987). Méthodologie de mesure de la dégradabilité *in sacco* de l'azote des aliments dans le rumen. *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix, INRA*, 69, 5-7.
- Mills J., France J., Dijkstra J.** (1999). A review of starch digestion in the lactating dairy cow and proposals for a mechanistic model: 2. Postruminal starch digestion and small intestinal glucose absorption. *J. Anim. Feed Sci.*, 8, 451-481.
- Millward D.J., Forrester T., Ah-Sing E., Yeboah N., Gibson N., Badaloo A., Boyne M., Reade M., Persaud C., Jackson A.** (2000). The transfer of ¹⁵N from urea in the human infant. *Br. J. Nutr.*, 83, 505-512.
- Mooney P., O'Donovan D.J.** (1970). The permeability of the rumen to simple nitrogenous compounds. *Biochem. J.*, 4, 119-121.
- Ndibualonji B.B., Dehareng D., Godeau J.M.** (1997). Influence de la mise à jeun sur l'aminoacidémie libre, l'urémie et la glycémie chez la vache laitière. *Ann. Zootech.*, 46, 163-174.
- Norton B.W., Mackintosh J.B., Armstrong D.G.** (1982a). Urea synthesis and degradation in sheep given pelleted-grass diets containing flaked barley. *Br. J. Nutr.*, 48, 249-264.
- NRC** (1985). Ruminant Nitrogen Usage. *US National Academy of Science, Washington D.C.*, 138p.
- Ørskov E. R.** (1984). Agricultural Research Council. The nutrient requirements of ruminant livestock. *Common. Agric. Bur., Slough, Engl.*
- Ørskov E. R., McDonald J.** (1979). The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *J. Agric. Sci. (Camb.)*, 92, 499-503.
- Parker D.S., Lomax M.A., Seal C.J., Wilton J.C.** (1995). Metabolic implications of ammonia production in the ruminant. *Proc. Nutr. Soc.*, 54, 549-563.

- Peyraud J.L., Le Liboux S., Vérité R.** (1997). Effet du niveau et de la nature de l'azote dégradable sur la digestion ruminale d'un régime à base d'ensilage de maïs chez la vache laitière. *Reprod. Nutr. Dev.*, 37, 313-328.
- Piepenbrink M.S., Schingoethe D.J., Brouk M.J., Stegeman G.A.** (1998). System to evaluate the protein quality of diets fed to lactating cows. *J. Dairy Sci.*, 76, 1046-1061.
- Poore M.H., Moore J.A., Eck T.P., Swingle R.S., Theurer C.B.** (1993). Effect of fiber source and ruminal starch degradability on site and extent of digestion in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 76, 2244-2253.
- Rémond D., Meschy F., Boivin R.** (1996). Metabolites, water and mineral exchanges across the rumen wall: mechanisms and regulation. *Ann. Zootech.*, 45, 97-119.
- Rémond D., Chaise J.P., Delval E., Poncet C.** (1993a). Net flux of metabolites across the ruminal wall of sheep fed twice a day with orchardgrass hay. *J. Anim. Sci.*, 71, 2529-2538.
- Rémond D., Chaise J.P., Delval E., Poncet C.** (1993b). Net transfer of urea and ammonia across the ruminal wall of sheep. *J. Anim. Sci.*, 71, 2785-2792.
- Rérat A., Corring T.** (1991). Animal factors affecting protein digestion and absorption. In: *M.W.A. Verstegen, J. Huisman and L.A. den Hartog (eds.). Digestive physiology in pigs, Proc., 5th Int. Symp. Digestive Physiology in Pigs. Wageningen, 24-26 April 1991. E.A.A.P. publ. n° 54, Pudoc, Wageningen, 5-34.*
- Reynolds C.K., Huntington G.B., Tyrrell H.F., Reynolds P.J.** (1988). Net portal-drained visceral and hepatic metabolism of glucose, L-lactate, and nitrogenous compounds in lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, 71, 1803-1812.
- Rodriguez L., Stallings C.C., Herbein J.H., McGilliard M.L.** (1997). Effect of degradability of dietary protein and fat on ruminal, blood, and milk components of Jersey and Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, 80, 353-363.
- Roseler D.K., Ferguson J.D., Sniffen C.J., Herrema J.** (1993). Dietary protein degradability effects on plasma and milk urea nitrogen and milk nonprotein nitrogen in Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, 76, 525-534.
- Rulquin H., Vérité R., Guinard-Flament J.** (2001a). Acides aminés digestibles dans l'intestin. Le système AADI et les recommandations d'apport pour la vache laitière. *INRA Prod. Anim.*, 14(4), 265-274.
- Rulquin H., Vérité R., Guinard-Flament J., Pisulewski P.M.** (2001b). Acides aminés digestibles dans l'intestin. Origines des variations chez les ruminants et répercussions sur les protéines du lait. *INRA Prod. Anim.*, 14(3), 201-210.
- Russell J.B., Sniffen C.F., Van Soest P.J.** (1983). Effect of carbohydrate limitation on degradation and utilization of casein by mixed rumen bacteria. *J. Dairy Sci.*, 66, 763-775.
- Sauvant D., Aufrère J., Michalet-Doreau B., Giger S., Chapoutot P.** (1987). Valeur nutritive des aliments concentrés simples: tables et prévision. *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix, I.N.R.A.*, 70, 75-89.
- Satter L.D., Slyter L.L.** (1974). Effect of ammonia concentration on rumen microbial protein production in vitro. *Br. J. Nutr.*, 32, 199-208.
- Schwab C.G.** (1996). Rumen-protected amino acids for dairy cattle: Progress towards determining lysine and methionine requirements. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 59, 87-101.
- Siddons R.C., Nolan J.V., Beever D.E., Macrae J.C.** (1985). Nitrogen digestion and metabolism in sheep consuming diets containing contrasting forms and levels of N. *Br. J. Nutr.*, 54, 175-178.
- Siest G.** (1968). Etude de la réaction urée-diacétylmonoxime II. Essais de divers adjuvants. Choix d'une méthode de dosage. *Ann. Biologie Clin.*, 26, 431-448.
- Simmonet H., Le Bars H., Mollé J.** (1957). Le cycle de l'urée administrée par voie buccale chez les ruminants. *Compt. Rend. Acad. Sci.*, 244, 943-945.

- Simon O., Zebrowska T., Bergner H., Munchmeyer R.** (1983). Investigations on the pancreatic and stomach secretion in pigs by means of continuous infusion of ¹⁴C-amino acids. *Arch. Tierernähr*, 33 (1), 9-22.
- Spanghero M., Kowalski Z.M.** (1997). Critical analysis of N balance experiments with lactating cows. *Livest. Prod. Sci.*, 52, 113-122.
- Susmel P., Spanghero M., Stefano B., Mills C.R.** (1995). Nitrogen balance and partitioning of some nitrogen catabolites in milk and urine of lactating cows. *Livest. Prod. Sci.*, 44, 207-219.
- Swanson E.W.** (1982). Estimation of metabolic protein requirements to cover unavoidable losses of endogenous nitrogen in maintenance of cattle. In *Protein requirements for cattle*. F.N. Owens, ed. Oklahoma State Univ., Stillwater, p183.
- Tamminga S.** (1992). Nutrition management of dairy cows as contribution to pollution control. *J. Dairy Sci.*, 75, 345-357.
- Tamminga S., Schulze H., Van Bruchem J., Huisman J.** (1995). The nutritional significance of endogenous N-losses along the gastro-intestinal tract of farm animals. *Arch. Anim. Nutr.*, 48, 9-22.
- Thonney M.L., Duhaime D.J., Moe P.W., Reid J.T.** (1979). Acid insoluble ash and permanganate lignin as indicators to determinate digestibility of cattle rations. *J. Anim. Sci.*, 49, 4, 1112-1116.
- Tisserand J.-L., Demarquilly C.** (1995). Digestion et absorption dans le gros intestin. In: *Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion*. Jarrige R., Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.H. Farce, M. Journet. Ed. INRA, 584-599.
- Toullec R., Lallès J.P.** (1995). Digestion dans la caillette et l'intestin grêle. In: *Jarrige, R., Ruckebusch, Y., Demarquilly, C., Farce, M.H., Journet, M. (eds.) Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion*. INRA. Paris, 527-581.
- Ulyatt M.J., Dellow D.W., Reed C.S.W., Bauchop T.** (1975). Structure and function of the large intestine of ruminants. In: *Mc Donald and Warner (eds), Digestion and metabolism in the ruminant, Proc. IV International Symp. On Ruminant Physiology, Univ. of New England. Publ. Unit. Armidale Australia*, 119-131.
- Van der Walt J.G.** (1993). Nitrogen metabolism of the ruminant liver. *Aust. J. Agric. Res.*, 44, 381-403.
- Van Keulen J., Young B. A.** (1977). Evaluation of acid-insoluble ash as a natural marker in ruminant digestibility studies. *J. Anim. Sci.*, 44 (2), 282-287.
- Van Soest P.J., Wine R. H.** (1967). Use of detergents in analysis of fibrous feeds. Determination of plant cell-wall constituents. *J. Assoc. Off. Agric. Chem.*, 50, 50-55.
- Van Vuuren A.M., Van der Koelen C.J., Valk H., De Visser H.** (1993). Effects of partial replacement of ryegrass by low protein feeds on rumen fermentation and nitrogen loss by dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 76, 2982-2993.
- Várady J., Fejes J.** (1987). Endogenous urea in the intestinal tract and its significance in nitrogen metabolism in ruminants. *Veterinarni Medicina*, 32, 195-200.
- Verbič J., Ørskov E.R., Žgajnar J., Chen X.B., Žnidaršič-Pongrac V.** (1999). The effect of method of forage preservation on the protein degradability and microbial protein synthesis in the rumen. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 82, 195-212.
- Vérité R., Delaby L.** (2000). Relation between nutrition, performances and nitrogen excretion in dairy cows. *Ann. Zootech.*, 49, 217-230.
- Vérité R., Peyraud J.L.** (1988). Nutrition azotée In : *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, Ed. INRA, France, chap. 4, 75-93.
- Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C.** (1987). Révision du système des PDI. *Bull. Tech. CRZV Theix, INRA*, 70, 19-34.

- Vermorel M., Coulon J.B., Journet M.** (1987). Révision du système des unités fourragères. *Bull. Tech. CRZV Theix, INRA*, 70, 9-18.
- Vignon B.** (1976). La fraction azotée non protéique du lait. Importance, nature et variations. Thèse de l'INPL, Nancy, France.
- Volden H.J.** (1999). Effects of level of feeding and ruminally undegraded protein on ruminal bacterial protein synthesis, escape of dietary protein, intestinal amino acid profile, and performances of dairy cows. *J. Anim. Sci.*, 77, 1905-1918.
- Wanjaiya G.W., Wales W.J., Dellow D.W.** (1993). Utilisation of white clover pasture and maize silage by lactating dairy cows. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*, 53, 73-75.
- Wilkerson V.A., Mertens D.R., Casper D.P.** (1997). Prediction of excretion of manure and nitrogen by Holstein dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 80, 3193-3204.
- Wright T.C., Moscardini S., Luimes P.H., Susmel P., Mc Bride B.W.** (1998). Effects of rumen-undegradable protein end feed intake on nitrogen balance and milk protein production in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 81, 784-793.
- Xu S., Harrison J.H., Chalupa W., Sniffen C., Julien W., Sato H., Fujieda T., Watanabe K., Ueda T., Suzuki H.** (1998). The effect of ruminal bypass lysine and méthionine on milk yield and composition of lactating cows. *J. Dairy Sci.*, 81, 1062-1077.
- Yang W.Z.** (1991). Etude cinétique de la colonisation microbienne des aliments dans le rumen de mouton. Conséquences sur la compartimentation de la biomasse et sur la dynamique de sortie du rumen dans le cas de différents types de rations. Thèse Université Clermont-Ferrand II, n° d'ordre 307, 390p.
- Zebrowska T., Simon O., Munchmeyer R., Bergner H., Zebrowska H.** (1982). Investigations on the amino acid secretion and absorption in the stomach of the growing pig. *Arch. Tierernähr*, 32 (10-11), 703-710.

Annexes

Annexe 1: Données bibliographique de la distribution de l'azote chez la vache en fonction de la teneur en MAT de la ration - Comparaison avec les données de l'expérimentation A

Références	MAT %	MSI kg/j	Ning g/j	N digéré g/j	N lait g/j	N fèces g/j	N urine g/j	Lait kg/j	N lait/ N ingéré	N lait/ N digéré	N fèces/ N ingéré	N urine/ N ingéré	N urine/ N digéré
Fisher <i>et al.</i> 2000	12,3	20,8	380	252	125	128	92	31,5	0,329	0,496	0,337	0,242	0,365
Susmel <i>et al.</i> 1995	12,7	14,5	295	186	91	109	72	21,0	0,308	0,489	0,369	0,244	0,387
Gonda <i>et al.</i> 1995	12,9	15,1	315	211	85	103	104	16,3	0,270	0,401	0,327	0,330	0,491
Gonda <i>et al.</i> 1995	12,9	16,7	349	237	101	111	104	19,9	0,290	0,424	0,319	0,300	0,437
Gonda et Lindberg 1994	13,0	15,1	313				104					0,332	
Gonda et Lindberg 1994	13,1	16,7	346				104					0,301	
Gonda <i>et al.</i> 1995	13,1	18,6	395	265	121	132	114	24,2	0,300	0,460	0,334	0,290	0,433
Gonda <i>et al.</i> 1995	13,1	18,8	398	259	122	139	106	23,4	0,310	0,471	0,350	0,270	0,409
Gonda et Lindberg 1994	13,2	18,8	395				107					0,271	
Gonda et Lindberg 1994	13,3	18,6	392				114					0,291	
Castillo <i>et al.</i> 2001a	13,3	16,0	341	204	102	137	87	20,1	0,300	0,500	0,400	0,250	0,425
Peyraud <i>et al.</i> 1997a	13,5	19,8	427	287	135	140	126	27,3	0,316	0,470	0,328	0,295	0,439
Peyraud <i>et al.</i> 1997a	13,5	20,0	433	300	138	133	124	28,4	0,319	0,460	0,307	0,286	0,413
Peyraud <i>et al.</i> 1997a	13,6	19,8	431	298	142	133	122	28,4	0,329	0,477	0,309	0,283	0,409
Castillo <i>et al.</i> 2001a	13,7	16,1	354	242	98	112	96	20,7	0,280	0,407	0,320	0,270	0,396
Kebreab <i>et al.</i> 2000	14,0	15,4	345	212	115	133	87	23,8	0,333	0,542	0,390	0,250	0,410
Frank <i>et al.</i> 2000	14,0	18,3	404		172		31,7	0,407					
Frank <i>et al.</i> 2000	14,0	19,9	441		168		31	0,369					
Castillo <i>et al.</i> 2001a	14,2	16,2	369	244	99	125	134	19,4	0,270	0,407	0,340	0,370	0,549
Castillo <i>et al.</i> 2001a	14,3	16,0	365	225	95	140	97	19,4	0,260	0,423	0,380	0,260	0,429
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,4	17,8	414	282	119	133	143	22,4	0,290	0,423	0,322	0,350	0,509
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,5	15,7	368	261	93	106	134	18,1	0,250	0,355	0,287	0,370	0,511
Castillo <i>et al.</i> 2001b	14,5	18,1	422	288	110	134	151	23,1	0,260	0,382	0,320	0,360	0,524
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,5	18,5	433	294	134	136	131	26,8	0,310	0,451	0,315	0,300	0,441
Gonda et Lindberg 1994	14,6	17,8	411				143					0,348	
Gonda et Lindberg 1994	14,6	18,5	428				131					0,306	
Gonda et Lindberg 1994	14,6	15,7	365				134					0,367	
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,7	18,6	442	296	133	145	136	26,0	0,300	0,448	0,330	0,300	0,458
Volden 1999	14,8	10,4	246	176		70	110	13,1			0,283	0,446	0,622
Wanjaiya <i>et al.</i> 1993	14,8	14,2	332	236	66	236	137	12,5	0,199	0,280		0,413	0,581
Volden 1999	14,8	19,7	467	326		141	129	29,4			0,301	0,276	0,348
Gonda et Lindberg 1994	14,9	18,6	440				136					0,309	
Kebreab <i>et al.</i> 2000	14,9	15,8	378	229	129	149	94	24,8	0,341	0,563	0,390	0,250	0,410
Van Vuuren <i>et al.</i> 1993	15,0	17,9	430	249	125	181	125		0,290	0,500	0,420	0,290	0,500
Roseler <i>et al.</i> 1993	15,2	22,0	528		135		26,4						
Fisher <i>et al.</i> 2000	15,3	22,8	510	354	150	156	154	34,2	0,294	0,424	0,306	0,302	0,435
Dinn <i>et al.</i> 1998	15,3	22,1	530	379	161	151	162	32,8	0,331	0,425	0,290	0,310	0,427
Piepenbrink <i>et al.</i> 1998	15,6	24,8	619		155		32,1	0,250					
Kebreab <i>et al.</i> 2000	15,7	16,3	409	252	131	157	105	25,5	0,320	0,520	0,380	0,260	0,417
Dhiman et Satter 1997	15,7	21,1	510		158		31,4	0,311					
Piepenbrink <i>et al.</i> 1998	15,7	25,5	641		157		32,7	0,245					
Rodriguez <i>et al.</i> 1997	15,9	18	458		139		22,5						
Wright <i>et al.</i> 1998	15,9	18,4	468	285	111	186	154	25,0	0,233	0,389	0,395	0,335	0,539
Rodriguez <i>et al.</i> 1997	15,9	23,2	590		170		32,3						
Piepenbrink <i>et al.</i> 1998	15,9	25,2	641		155		32,3	0,242					
Rodriguez <i>et al.</i> 1997	16,0	17,9	458		136		22,7						
Rodriguez <i>et al.</i> 1997	16,0	23,1	591		162		33,2						
Kebreab <i>et al.</i> 2000	16,1	15,3	395	252	122	143	118	24,7	0,309	0,484	0,360	0,300	0,468
Castillo <i>et al.</i> 2001b	16,2	17,9	465	315	114	150	162	24,1	0,240	0,362	0,320	0,350	0,514
Van Vuuren <i>et al.</i> 1993	16,4	16,8	440	282	128	158	154		0,290	0,453	0,360	0,350	0,547
Castillo <i>et al.</i> 2001b	16,4	17,9	469	326	118	143	184	23,4	0,250	0,362	0,310	0,380	0,564
Fisher <i>et al.</i> 2000	16,4	21,8	510	369	154	141	180	35,0	0,302	0,417	0,276	0,353	0,488
Roseler <i>et al.</i> 1993	16,4	21,3	560		132		25,2						
Kebreab <i>et al.</i> 2000	16,5	17,7	467	310	135	157	153	28,2	0,289	0,435	0,350	0,340	0,494
Kebreab <i>et al.</i> 2000	16,6	17,3	459	296	130	163	144	26,1	0,283	0,439	0,380	0,330	0,486
Wilkerson <i>et al.</i> 1997	16,6	17,9	475	312	141	163	164	29,0	0,297	0,452	0,343	0,346	0,527
Kebreab <i>et al.</i> 2000	16,7	17,3	462	298	137	164	140	26,9	0,297		0,370	0,320	0,470
Castillo <i>et al.</i> 2001b	16,7	17,7	472	341	116	131	219	23,8	0,250	0,340	0,280	0,460	0,642
Dinn <i>et al.</i> 1998	16,7	22,3	580	425	171	155	195	32,8	0,293	0,402	0,268	0,340	0,459

**Annexe 2: Données bibliographiques de la distribution de l'azote chez la vache en fonction de la teneur en MAT de la ration -
Comparaison avec les données de l'expérimentation B**

Références	MAT %	MSI kg/j	Ning g/j	N digéré g/j	N lait g/j	N fèces g/j	N urine g/j	Lait kg/j	N lait/ N ingéré	N lait/ N digéré	N fèces/ N ingéré	N urine/ N ingéré	N urine/ N digéré
Fisher <i>et al.</i> 2000	12,3	20,8	380	252	125	128	92	31,5	0,329	0,496	0,337	0,242	0,365
Susmel <i>et al.</i> 1995	12,7	14,5	295	186	91	109	72	21,0	0,308	0,489	0,369	0,244	0,387
Gonda <i>et al.</i> 1995	12,9	15,1	315	211	85	103	104	16,3	0,270	0,401	0,327	0,330	0,491
Gonda <i>et al.</i> 1995	12,9	16,7	349	237	101	111	104	19,9	0,290	0,424	0,319	0,300	0,437
Gonda et Lindberg 1994	13,0	15,1	313				104					0,332	
Gonda et Lindberg 1994	13,1	16,7	346				104					0,301	
Gonda <i>et al.</i> 1995	13,1	18,6	395	265	121	132	114	24,2	0,300	0,460	0,334	0,290	0,433
Gonda <i>et al.</i> 1995	13,1	18,8	398	259	122	139	106	23,4	0,310	0,471	0,350	0,270	0,409
Gonda et Lindberg 1994	13,2	18,8	395				107					0,271	
Gonda et Lindberg 1994	13,3	18,6	392				114					0,291	
Castillo <i>et al.</i> 2001a	13,3	16,0	341	204	102	137	87	20,1	0,300	0,500	0,400	0,250	0,425
Peyraud <i>et al.</i> 1997a	13,5	19,8	427	287	135	140	126	27,3	0,316	0,470	0,328	0,295	0,439
Peyraud <i>et al.</i> 1997a	13,5	20,0	433	300	138	133	124	28,4	0,319	0,460	0,307	0,286	0,413
Peyraud <i>et al.</i> 1997a	13,6	19,8	431	298	142	133	122	28,4	0,329	0,477	0,309	0,283	0,409
Castillo <i>et al.</i> 2001a	13,7	16,1	354	242	98	112	96	20,7	0,280	0,407	0,320	0,270	0,396
Kebreab <i>et al.</i> 2000	14,0	15,4	345	212	115	133	87	23,8	0,333	0,542	0,390	0,250	0,410
Frank <i>et al.</i> 2000	14,0	18,3	404		172		31,7	0,407					
Frank <i>et al.</i> 2000	14,0	19,9	441		168		31	0,369					
Castillo <i>et al.</i> 2001a	14,2	16,2	369	244	99	125	134	19,4	0,270	0,407	0,340	0,370	0,549
Castillo <i>et al.</i> 2001a	14,3	16,0	365	225	95	140	97	19,4	0,260	0,423	0,380	0,260	0,429
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,4	17,8	414	282	119	133	143	22,4	0,290	0,423	0,322	0,350	0,509
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,5	15,7	368	261	93	106	134	18,1	0,250	0,355	0,287	0,370	0,511
Castillo <i>et al.</i> 2001b	14,5	18,1	422	288	110	134	151	23,1	0,260	0,382	0,320	0,360	0,524
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,5	18,5	433	294	134	136	131	26,8	0,310	0,451	0,315	0,300	0,441
Gonda et Lindberg 1994	14,6	17,8	411				143					0,348	
Gonda et Lindberg 1994	14,6	18,5	428				131					0,306	
Gonda et Lindberg 1994	14,6	15,7	365				134					0,367	
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,7	18,6	442	296	133	145	136	26,0	0,300	0,448	0,330	0,300	0,458
Volden 1999	14,8	10,4	246	176		70	110	13,1			0,283	0,446	0,622
Wanjaiya <i>et al.</i> 1993	14,8	14,2	332	236	66	236	137	12,5	0,199	0,280		0,413	0,581
Volden 1999	14,8	19,7	467	326		141	129	29,4			0,301	0,276	0,348
Gonda et Lindberg 1994	14,9	18,6	440				136					0,309	
Kebreab <i>et al.</i> 2000	14,9	15,8	378	229	129	149	94	24,8	0,341	0,563	0,390	0,250	0,410
Van Vuuren <i>et al.</i> 1993	15,0	17,9	430	249	125	181	125		0,290	0,500	0,420	0,290	0,500

Annexe 3: Données bibliographiques de la distribution de l'azote chez la vache en fonction de la teneur en MAT de la ration - Comparaison avec les données de l'expérimentation C

	MAT	MSI	N ingéré	N digéré	Lait	N lait	N fèces	N urine	N lait/	N lait/	N fèces/	N urine/	N urine/
	%	kg/j	g/j	g/j	kg/j	g/j	g/j	g/j	N ingéré	N digéré	N ingéré	N ingéré	N digéré
Expérimentation C	11,8	19,2	366	200	23,5	122	166	77	0,334	0,621	0,455	0,211	0,388
	12,2	20,5	403	232	24,7	134	171	83	0,332	0,588	0,425	0,208	0,364
	13,7	20,2	447	278	26,1	142	167	123	0,315	0,510	0,380	0,277	0,450
	14,2	21,3	485	318	26,6	156	167	141	0,318	0,489	0,344	0,290	0,450
Références													
Susmel <i>et al.</i> 1995	11,0	15,1	265	146	16,6	81	119	58	0,306	0,555	0,449	0,219	0,397
Susmel <i>et al.</i> 1995	11,1	13,0	231	132	22,3	88	99	53	0,381	0,667	0,429	0,229	0,402
Susmel <i>et al.</i> 1995	11,2	14,3	256	152	20,2	82	104	49	0,320	0,539	0,406	0,191	0,322
Roseler <i>et al.</i> 1993	12,2	20,5	400		23,6	122							
Fisher <i>et al.</i> 2000	12,3	20,8	380	252	31,5	125	128	92	0,329	0,496	0,337	0,242	0,365
Susmel <i>et al.</i> 1995	12,7	14,5	295	186	21	91	109	72	0,308	0,489	0,369	0,244	0,387
Gonda <i>et al.</i> 1995	12,9	15,1	315	211	16,3	85	103	104	0,270	0,401	0,327	0,330	0,491
Gonda <i>et al.</i> 1995	12,9	16,7	349	237	19,9	101	111	104	0,290	0,424	0,319	0,300	0,437
Gonda et Lindberg 1994	13,0	15,1	313					104				0,332	
Gonda et Lindberg 1994	13,1	16,7	346					104				0,301	
Gonda <i>et al.</i> 1995	13,1	18,6	395	265	24,2	121	132	114	0,300	0,460	0,334	0,290	0,433
Gonda <i>et al.</i> 1995	13,1	18,8	398	259	23,4	122	139	106	0,310	0,471	0,350	0,270	0,409
Gonda et Lindberg 1994	13,2	18,8	395					107				0,271	
Gonda et Lindberg 1994	13,3	18,6	392					114				0,291	
Castillo <i>et al.</i> 2001a	13,3	16,0	341	204	20,1	102	137	87	0,300	0,500	0,400	0,250	0,425
Peyraud <i>et al.</i> 1997a	13,5	19,8	427	287	27,3	135	140	126	0,316	0,470	0,328	0,295	0,439
Peyraud <i>et al.</i> 1997a	13,5	20,0	433	300	28,4	138	133	124	0,319	0,460	0,307	0,286	0,413
Peyraud <i>et al.</i> 1997a	13,6	19,8	431	298	28,4	142	133	122	0,329	0,477	0,309	0,283	0,409
Castillo <i>et al.</i> 2001a	13,7	16,1	354	242	20,7	98	112	96	0,280	0,407	0,320	0,270	0,396
Kebreab <i>et al.</i> 2000	14,0	15,4	345	212	23,8	115	133	87	0,333	0,542	0,390	0,250	0,410
Frank <i>et al.</i> 2002	14,0	18,3	404		31,7	172			0,407				
Frank <i>et al.</i> 2002	14,0	19,9	441		31,0	168			0,369				
Castillo <i>et al.</i> 2001a	14,2	16,2	369	244	19,4	99	125	134	0,270	0,407	0,340	0,370	0,549
Castillo <i>et al.</i> 2001a	14,3	16,0	365	225	19,4	95	140	97	0,260	0,423	0,380	0,260	0,429
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,4	17,8	414	282	22,4	119	133	143	0,290	0,423	0,322	0,350	0,509
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,5	15,7	368	261	18,1	93	106	134	0,250	0,355	0,287	0,370	0,511
Castillo <i>et al.</i> 2001b	14,5	18,1	422	288	23,1	110	134	151	0,260	0,382	0,320	0,360	0,524
Cunningham 1996	14,5	18,3	425		33,8								
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,5	18,5	433	294	26,8	134	136	131	0,310	0,451	0,315	0,300	0,441
Gonda et Lindberg 1994	14,6	17,8	411					143				0,348	
Gonda et Lindberg 1994	14,6	18,5	428					131				0,306	
Gonda et Lindberg 1994	14,6	15,7	365					134				0,367	
Gonda <i>et al.</i> 1995	14,7	18,6	442	296	26	133	145	136	0,300	0,448	0,330	0,300	0,458
Volden 1999	14,8	10,4	246	176	13,1		70	110			0,283	0,446	0,622
Wanjaiya <i>et al.</i> 1993	14,8	14,2	332	236	12,5	66	236	137	0,199	0,280		0,413	0,581
Volden 1999	14,8	19,7	467	326	29,4		141	129			0,301	0,276	0,395
Gonda et Lindberg 1994	14,9	18,6	440					136				0,309	
Kebreab <i>et al.</i> 2000	14,9	15,8	378	229	24,8	129	149	94	0,341	0,563	0,390	0,250	0,410
Van Vuuren <i>et al.</i> 1993	15,0	17,9	430	249		125	181	125	0,290	0,500	0,420	0,290	0,500

**AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE**

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

**Monsieur Roger DACCORD, Directeur de Recherche, Station Fédérale en Recherches en
Production Animale, Posieux-Suisse**

Monsieur Michel DOREAU, Directeur de Recherche, INRA, Saint-Genès-Champanelle

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Madame MONTEILS Valérie

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**«Distribution de l'azote entre le lait, les fèces et l'urine chez la vache laitière alimentée
avec des rations déficitaires en azote fermentescible».**

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANCEUVRE CEDEX

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : **«SCIENCES AGRONOMIQUES»**

Fait à Vandoeuvre le, 9 décembre 2002

Le Président de l'I.N.P.L.,

L. SCHUFFENECKER



RESUME

La variation de la distribution d'azote dans les compartiments lait, urine et fèces a été étudiée chez la vache laitière. Une modélisation avec les données bibliographiques démontre l'impact déterminant de la teneur en MAT de la ration sur la prédiction des quantités sécrétées et rejetées. Les rations utilisées lors des expérimentations sont conçues avec un déficit en azote fermentescible (dPDI ~10g/kg MS) pour optimiser la valorisation dans le lait par un recyclage accru.

Un premier essai utilisant des teneurs entre 13 et 16% de MAT dans la ration confirme que les quantités exportées augmentent avec la teneur en MAT. La valorisation dans le lait de l'azote ingéré ou de l'azote digéré diminue alors que la digestibilité apparente de l'azote et le rapport azote urinaire / azote apporté augmentent.

Un deuxième essai montre que, pour des rations à 13 et 14% de MAT, la réponse de l'exportation de l'azote dans le lait ne dépend pas du stade de lactation (semaine de lactation 3 à 18), les facteurs stade et teneur en MAT étant indépendants.

Enfin, un troisième essai a été mené pour étudier l'effet d'un apport supplémentaire d'énergie (+0,05 UFL/kg MS) sur la distribution de l'azote pour deux niveaux azotés donnés (12 et 14% MAT). Cet apport d'énergie génère une augmentation d'ingestion d'azote et une augmentation de sa digestibilité apparente. Il permet de maintenir la part de l'azote apporté dans le lait pour les deux niveaux azotés. Même si l'excrétion urinaire d'azote représente des parts similaires avec les deux apports énergétiques, il y a une augmentation de la proportion d'azote uréique par l'apport supplémentaire d'énergie pour la ration 14% MAT. Pour ce régime, l'augmentation d'ingestion d'azote, suite à un apport supplémentaire d'énergie, n'est pas entièrement compensée.

La valorisation systématiquement supérieure dans le lait de l'azote apporté par rapport aux valeurs moyennes des données de la littérature, pour une gamme proche de teneur en MAT de la ration, peut s'expliquer par une mise à disposition supplémentaire d'azote au métabolisme par le recyclage. Les excréments urinaire et fécale d'azote dépendent moins fortement à ce déficit d'azote fermentescible.

Mots clefs: Azote, Valorisation, Distribution, Vache laitière

SUMMARY

The variation of the nitrogen distribution in the output compartments milk, urine and faeces has been studied in dairy cows. A model carried out by bibliographic analysis shows the central role of the crude protein level of diets on predictions of nitrogen recovery in milk or its losses in urine or faeces. All experimental diets are made using a systematically deficit of rumen fermentable nitrogen (dPDI ~10 g/kg DM) to maximise utilisation in milk by favouring nitrogen recycling.

The first trial confirmed that all N outputs increased with the CP level, running from 13 to 16% of the DM. The recovery rate in milk of nitrogen intake or digested nitrogen decreased whereas digestibility and relative urinary losses increased.

A second trial showed for two CP levels (13% and 14%), that its determination on the nitrogen recovery in milk was independent of lactation state as this last factor and CP level affected separately milk nitrogen.

The third trial studied the effect of an additional energy supply for two given CP levels in the diet (12% and 14%) on nitrogen outputs. This supply enhanced an increased nitrogen intake and apparent digestibility. No improvement by the supplementary energy of the recovery rate of fed nitrogen in milk has been noted for both CP levels. Even if urinary losses were similar between both energy supplies at both CP levels, at the higher level (14% CP) feed nitrogen loosed in urine as urea nitrogen is higher with the supplementary energy. In this case, the increased nitrogen intake are not completely buffered by a more efficient metabolic conversion into milk.

For a given range of CP levels, the metabolic utilisation of feed nitrogen in milk in our trials was systematically higher than the bibliographic values in average. As recycling has been stimulated in all diets by a systematic deficit of fermentable nitrogen, this result could be du to an underestimated metabolic nitrogen supply. The nitrogen recovered in urine and faeces was less sensitively affected by this supplementary nitrogen source.

Key words: nitrogen, utilization, distribution, dairy cow