

Prévision des rejets azotés des ruminants dans le projet Systali

SAUVANT D (1), CANTALAPIEDRA-HIJAR G. (2), NOZIERE P (2)

(1) INRA et AgroParisTech, UMR Mosar, INRA-AgroParisTech, 16 rue C. Bernard, F-75005 Paris, France.

(2) INRA et VetagroSup, UMR Herbivores, Saint Genès Champanelle, F-63122, France.

RESUME

Les préoccupations actuelles liées aux rejets dans l'environnement d'éléments liés aux activités d'élevage, soulèvent la question de la précision de leur prévision. C'est en particulier le cas des rejets d'azote fécal (Nfec) et urinaire (Nur) par les ruminants. Le projet INRA Systali de rénovation des systèmes d'unités alimentaires des ruminants se distingue des précédents par le fait qu'il prend mieux en compte, et de façon quantitative, les phénomènes biologiques majeurs liés à la digestion des aliments et à la métabolisation des nutriments. Il a donc semblé opportun de chercher à tirer profit de la meilleure « mécanisticité » du modèle Systali pour prévoir plus précisément à l'échelle d'un animal moyen, les niveaux des rejets azotés fécaux et urinaires et en tirer un moyen de diagnostic affiné sur le terrain.

Un sous-modèle spécifique de prévision des rejets Nfec et Nur a été mis en place au sein des calculs des rations, des besoins des animaux et de leurs réponses aux pratiques alimentaires. Pour les rejets Nfec le calcul utilise directement certains paramètres digestifs du système PDI: les protéines alimentaires non dégradées dans le rumen (PIA), les protéines microbiennes (PIM) et la fraction NDF non digestible de la ration. Pour les rejets d'Nur, une approche factorielle permet de quantifier de façon séparée l'ensemble des facteurs impliqués. En particulier, il est possible de prédire les deux principales origines digestive et métabolique de Nur. L'origine digestive principale est liée au niveau de gâchis d'N dans le rumen, elle est quantifiée par le nouveau paramètre BalProRu qui correspond au bilan protéique du rumen. L'origine métabolique est appréhendée à travers l'efficacité des PDI qui peut largement varier (moins de 50% à plus de 80%), tout en présentant la même valeur pour l'ensemble des fonctions de protéosynthèse de l'organisme (Sauvant *et al.*, 2015). Ces variations d'efficacité des PDI permettent d'en déduire celles de leur inefficacité qui est à l'origine de Nur d'origine métabolique. Cette approche factorielle de Nur permet non seulement d'obtenir une prédiction fiable (ETR = 0,02 et 0,05 gNur/kgPV pour les vaches et chèvres respectivement) de son niveau mais également d'avoir une idée du poids relatif des différentes origines digestive ou métabolique pour en déduire un diagnostic de ration.

Empirical modelling of N losses in ruminants in the INRA systali project.

SAUVANT D (1), CANTALAPIEDRA-HIJAR G, NOZIERE P

(1) INRA et AgroParisTech, UMR Mosar, INRA-AgroParisTech, Paris

SUMMARY

Current concerns related to environmental releases of elements related to livestock productions, raise the question of the accuracy of their predictions. This is particularly the case for nitrogen losses in feces (Nfec) and in urine (Nur) by ruminants. The INRA Systali project of updating the feed unit systems for ruminants differs from the previous one because it better takes into account, and quantitatively, the major biological phenomena related to feed digestion and nutrient metabolism. It therefore seemed appropriate to seek to benefit from the improved "mechanisticity" of the systali model to more accurately predict the Nfec and Nur losses and make a precise diagnosis on the field. A specific sub-model of Nfec and Nur losses was set up in the processes of calculations of rations, requirements of animals and their responses to dietary practices. For Nfec losses the calculation directly uses the digestive parameters of the PDI system: dietary protein not degraded in the rumen (PIA), microbial proteins (PIM) and non digestible NDF fraction of the ration. For losses of Nur, a factorial approach quantifies separately all the factors involved. In particular, it is possible to predict the two main digestive and metabolic origins of Nur. The main digestive origin is related to the level of N excess in the rumen, it is predicted by the new "BalProRu" parameter (protein balance in the rumen). The metabolic origin is tackled through the PDI efficiency which may vary widely (from less than 50% to over 80%), while having the same value for all of the body's protein synthesis functions (Sauvant *et al.*, 2015). These PDI efficiency variations allow inferring those of their inefficiency which is the major cause of metabolic origin of Nur losses. This factorial approach of Nur not only provides a reliable prediction of its level, but also gives an idea of the relative weight of the different origins, digestive or metabolic, of Nur to deduce a diagnosis of ration.

INTRODUCTION

La question des rejets azotés liés aux activités d'élevage encourage à améliorer la précision de leur prévision. C'est en particulier le cas des rejets d'azote fécal (Nfec) et urinaire (Nur) par les ruminants. Jusqu'alors, en pratique, on s'appuyait principalement sur la connaissance des niveaux moyens de rejets azotés à attendre pour les principaux types de systèmes alimentaires ou de production (Peyraud *et al.*, 2014). Ces références ne présentent cependant qu'une précision et un intérêt limité au regard des variations

importantes observables au sein de chaque ration type et dans la perspective de pouvoir disposer d'une information et d'un diagnostic plus spécifique à chaque élevage.

Le projet INRA Systali de rénovation des systèmes d'unités alimentaires des ruminants se distingue des précédents par le fait qu'il prend mieux en compte les phénomènes quantitatifs biologiques majeurs liés à la digestion des aliments (Sauvant et Nozière, 2013 et 2016) et à la métabolisation des nutriments, protéiques en particulier (Sauvant *et al.*, 2015). Il a donc semblé opportun de chercher à tirer profit de la meilleure « mécanisticité » de ce modèle

Systali pour prévoir plus précisément à l'échelle d'un animal moyen ingérant un régime donné, les niveaux des rejets Nfec et Nur et en tirer un moyen de diagnostic affiné sur le terrain.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Bases de données, traitement statistiques et calculatoires

Plusieurs bases de données ont été créés avec des données expérimentales sur la nutrition des bovins (Bovidig), caprins (Caprinut) et ovins (Ovidig). Pour chaque traitement les valeurs UFL et PDI du régime ont été systématiquement calculées avec l'outil « Systool » (Chapoutot et al., 2013) selon la méthode systali décrite par Sauvante et Nozière (2013 et 2016).

1.2. Calculs des rejets N

Pour le calcul des rejets fécaux on s'est basé sur un vaste ensemble de données de digestibilité de la base Bovidig avec des animaux porteurs de canules au duodénum de façon à pouvoir « brancher » les prévisions de Nfec sur le modèle digestif Systali. En outre, on a cherché à prédire les variations du rapport C/N des fèces qui est un critère utile de la valeur des fumiers et lisiers.

Pour le calcul des rejets N urinaires il a été nécessaire de calculer l'efficacité métabolique des PDI pour l'ensemble des fonctions de protéosynthèse de l'organisme. Ces fonctions sont les synthèses des protéines fécales endogènes, des phanères, du lait et du dépôt corporel. Ces calculs ont été détaillés par Sauvante et al. (2015).

2. RESULTATS

2.1. REJETS D'N FECAL OU NON DIGESTIBLE

2.1.1. Prédiction de Nfec

Etant donné que les nouveaux calculs permettent de prédire avec une bonne précision les flux protéiques (N x 6,25) au duodénum (endogène, microbien et d'origine alimentaire) nous avons cherché à prédire le flux Nfec à partir de mesures de flux effectuées simultanément aux niveaux duodénaux et fécaux. La teneur en Nfec varie assez peu ($8,42 \pm 2,02$ g N/kgMS ingérée). Dans les tables d'aliments chaque matière première est caractérisée par sa teneur en MAT et la digestibilité des MAT (N x 6,25), cela permet donc de prédire sa teneur moyenne en N fécal. Pour le calcul des rations on ne peut appliquer un calcul de la somme pondérée des Nfec des aliments en raison des interactions digestives. En conséquence on utilise la régression intra-expérience suivante, construite à travers un ensemble diversifié de rations:

Nfec = (26,9 + 0,193 PIA + 0,106 PIM + 0,022 NDNDf)/6,25 [1] (n = 484, ETR=0,13)

avec, en g/kgMSI, Nfec = N fécal, PIA = protéines d'origine alimentaire au duodénum, PIM = protéines microbiennes au duodénum et NDNDf = NDF non digestible fécal.

2.1.2. Rapport C/N des fèces

Dans la base Bovidig, les valeurs généralement appliquées de teneurs de 0,037 mol C/g MO fécale et de 0,045 mol N/g MA fécale ont été utilisées. Il a alors été possible d'en déduire le rapport molaire C/N des fèces (C/N = $20,3 \pm 5,3$ g/g, n=1320). Ce rapport dépend étroitement de la teneur en protéines brutes du régime selon la relation :

C/N = 14,2 + 52,7 exp(-0,014 MAT) [2]

(n=1317, nexp=463, ETR=1,82).

avec MAT la teneur en protéines brutes (g/kgMSI). La Figure 1 présente cette relation.

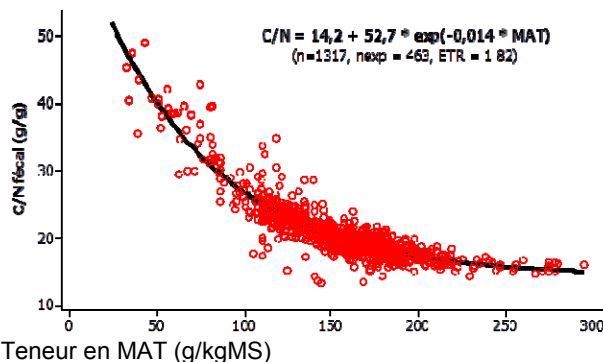


Figure 1 : Influence de la teneur en protéines brutes du régime sur le rapport C/N des fèces chez les bovins :

2.2. REJETS N URINAIRES

L'enjeu de la prévision de ces rejets est essentiel car il est connu que ce sont eux qui sont les plus importants, les plus variables d'une ration à l'autre et qui correspondent à des formes azotées agressives car à évolution rapide dans l'air et le sol. Ces pertes ont deux principales origines chez les ruminants, le tube digestif et l'utilisation métabolique des PDI (Faverdin et Vérité, 1998), ces aspects sont détaillés ci-dessous à travers les nouvelles connaissances.

2.2.1. Digestion de l'azote

La digestion des protéines alimentaires dans le rumen se traduit en général par le fait que le flux azoté quittant cet organe par le duodénum est plus faible que celui d'entrée. Ce phénomène traduit une perte azotée qui est liée au fait que le flux d'N-NH₃ absorbé est plus élevé que le flux d'N d'urée recyclée. Ce flux d'N-NH₃ excédentaire se retrouve en grande partie perdu par la voie urinaire. Ainsi la Figure 2 montre la relation intra-expérience précise liant les mesures des teneurs en N ammoniacal (N-NH₃) du jus de rumen avec les rejets d'Nur.

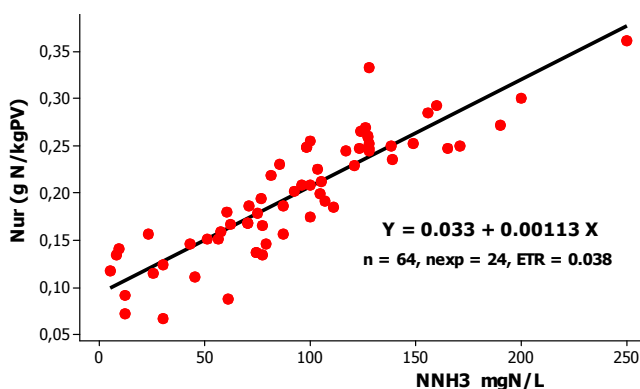


Figure 2 : Influence de la teneur en N-NH₃ du jus de rumen sur les rejets Nur chez les bovins (Base Bovidig).

Il arrive cependant, pour des régimes pauvres en protéines (MAT<13%MS environ), que le recyclage d'N urée domine, dans ce cas le flux d'N au duodénum est plus élevé que l'ingéré. Pour capturer au mieux ce phénomène d'échange Nurée – NNH₃ à travers la paroi du rumen au moyen d'un paramètre intégrable dans les calculs de ration nous avons proposé le critère BalProRu = MATingérées – MATduodénum en g/kgMS (Sauvante et Nozière 2013 et 2016). Il s'avère que BalProRu représente la part la plus importante et la plus variable des pertes azotées urinaires (50% en moyenne et variant de 0 à 80 % environ de Nur) et il en est, de ce fait, le meilleur prédicteur (voir plus loin).

2.2.2. Efficacité métabolique des PDI

Jusqu'à présent, les systèmes d'unités protéiques supposaient que l'efficacité des PDI (EffPDI) était constante, égale à 64% dans le système PDI français et à 67% dans la

plupart des autres systèmes. Des propositions récentes ont suggéré que cette efficacité pouvait varier pour les ruminants laitiers ou en croissance (Volden, 2011). Pour aboutir à une proposition étayée sur cette question nous avons comparé trois hypothèses de travail (1) EffPDI fixe et égal à 64% comme dans le système PDI précédent, (2) EffPDI variable pour le lait et fixe pour les autres fonctions de protéosynthèse (3) EffPDI variable pour toutes les fonctions de protéosynthèse de l'organisme. Cette comparaison a été détaillée par Sauvant et al. (2015), il apparaît que l'hypothèse (3) permet de prédire bien plus précisément EffPDI à travers les régimes et les animaux (vaches et chèvres laitiers). En pratique, pour appliquer l'hypothèse (3) le calcul de EffPDI se fait selon deux formules proches, la première s'applique lorsque le bilan d'énergie est positif, dans ce cas le bilan protéique (BilPROT) qui lui est lié est un besoin :

$$\text{EffPDI}\% = 100 \times (\text{PEF} + \text{PHA} + \text{MP} + \text{BilPROT}) / (\text{PDling} - \text{PDIURE}) \quad [3a]$$

et l'autre lorsque le bilan est négatif, la mobilisation protéique constitue alors un apport :

$$\text{EffPDI}\% = 100 \times (\text{PEF} + \text{PHA} + \text{MP}) / (\text{PDling} + |\text{BilPROT}| - \text{PDIURE}) \quad [3b]$$

avec EffPDI% l'efficacité métabolique des PDI (%), PEF les protéines endogènes fécales (g/j), PHA les pertes protéiques par les phanères, MP les protéines produites dans le lait (g/j), BilPROT le bilan protéique corporel (g/j) indexé sur le bilan d'énergie, PDling les PDI ingérés (g/j) et PDIURE le besoin protéique associé aux pertes d'N endogènes urinaires (g PDI/j). EffPDI attachée à cette dernière perte est de 100% d'où sa soustraction systématique aux PDI ingérés dans les équations [3a] et [3b]. Les équations de prédiction des critères PEF, PHA, BilPROT et PDIURE ont déjà été présentées et discutées par Sauvant et al. (2014, 2015).

2.2.3. Calcul factoriel des rejets N urinaires

Selon nos estimations, une proportion de 20 à 30% d'N urinaire (Nur) est d'origine endogène et peut être prédit à partir du poids vif (cf. PDIURE ci-dessus). Le reste du flux de Nur dépend principalement de EffPDI, évoqué ci-dessus et du critère BalProRu (Sauvant et al., 2014, 2015).

Pratiquement, un calcul factoriel est effectué en sommant les cinq principales sources d'Nur tous les critères étant exprimés en g N/kgPV,

(1) Nur lié aux variations de $N_{\text{BalProRu}} = \text{BalProRu}/6.25$. Au sein des bases de données traitées Nur est en moyenne égal à 0,79, 0,63 et 0,77 g Nur/kgPV par g de N_{BalProRu} pour les bovins, caprins et ovins respectivement (Sauvant et al., 2015)

(2) Nur lié à l'inefficacité des PDI pour les 4 fonctions de synthèses protéiques du lait (MP), des protéines endogènes fécales (PEF), des phanères (PHA) et des variations du bilan protéique corporel (BilPROT) et qui est égal à $\text{IneffPDI} = \text{PDI} (1 - \text{EffPDI})/6.25$ en gN/kgPV. Ces calculs sont directement déduits des équations [3a] et [3b].

(3) Nur endogène considéré comme égal à $0,050 \times \text{PVkg}$ (Sauvant et al., 2015).

(4) Nur issu de l'azote microbien non aminé tel qu'il a été calculé comme égal à 7,89% du flux N microbien prédit au duodénum (Sauvant et al., 2014)

(5) Nur lié au phénomène de biais systématique de mesure appelé « défaut de bilan N » et qui correspond à une sous-estimation du flux de Nur et une surestimation du bilan N corporel, on le considère comme égal à 0,47 fois ce bilan N (Sauvant et al., 2015).

2.2.4. Evaluation de la méthode

Elle a été pratiquée sur un sous ensemble de données de vaches et de chèvres pour lesquelles, d'une part, les calculs Systali avaient été effectués et d'autre part, des résultats de mesures de Nur étaient disponibles. Dans la suite toutes les valeurs sont exprimées en g Nur/kgPV pour rendre les résultats des deux espèces comparables.

Ainsi, pour les vaches laitiers, avec la base de données Bovidig, on dispose de 241 données issues de 61 expériences (Nur = $0,303 \pm 0,107$ g N/kgPV). La régression globale entre les données mesurées (mesNur) et prédites par la méthode décrite ne se différencie pas de la première bissectrice :

$$\text{mesNur} = 1,00 \text{ predNur} \quad (n = 241, R^2 = 0,80, \text{ETR} = 0,05) \quad [4a]$$

La régression intra-expérience présente une meilleure précision mais avec une pente légèrement inférieure à 1 :

$$\text{mesNur} = 0,05 + 0,83 \text{ predNur} \quad (n = 239, n_{\text{exp}} = 6, \text{ETR} = 0,02) \quad [4b].$$

La Figure 3 présente les relations [4a] et [4b].

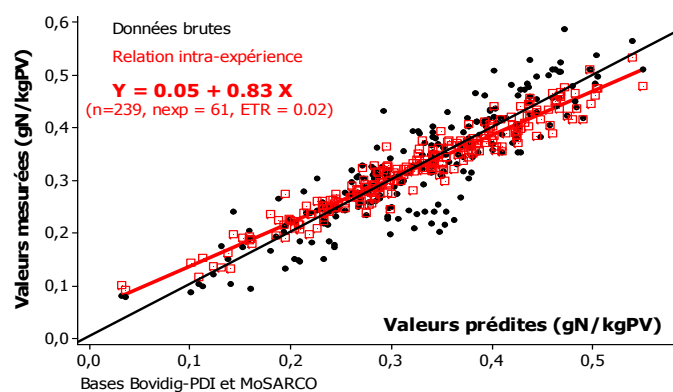


Figure 3 : Evaluation de la prévision des rejets azotés urinaires par les vaches laitiers

Pour les chèvres laitiers, on dispose de 137 données issues de 45 expériences (Nur = $0,330 \pm 0,154$ g N/kgPV). Dans ce cas également, la régression globale entre les données mesurées (mesNur) et prédites par la méthode décrite ne se différencie pas de la première bissectrice :

$$\text{mesNur} = 1,05 \text{ predNur} \quad (n = 137, R^2 = 0,58, \text{ETR} = 0,11) \quad [5a]$$

Comme pour les vaches, la régression intra-expérience présente une meilleure précision mais une pente légèrement inférieure à 1 :

$$\text{mesNur} = 0,04 + 0,88 \text{ predNur} \quad (n = 134, n_{\text{exp}} = 45, \text{ETR} = 0,05) \quad [5b]$$

La Figure 4 présente les relations [5a] et [5b].

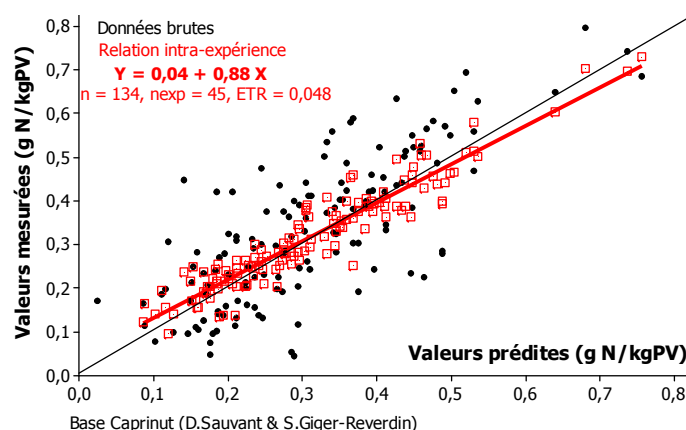


Figure 4: Evaluation de la prévision des rejets azotés urinaires par les chèvres laitiers

Ces différents résultats permettent de valider la méthode proposée qui s'avère être plus précise que les prévisions basées sur les bilans N des animaux. En outre, les résultats révèlent une bonne analogie entre les deux espèces dont les métabolismes azotés apparaissent être de ce fait assez semblables. Enfin, sans qu'on puisse en expliquer les

raisons, il y a une meilleure précision des prédictions pour les vaches que pour les chèvres.

2.2.5. Application au diagnostic de ration

Selon les résultats obtenus sur ces deux espèces, il apparaît que les deux composantes majeures de la perte azotée urinaire sont d'abord le bilan des échanges Nurée – NNH3 dans la paroi du rumen (ou ce qui revient au même, l'équilibre azote-énergie du rumen), caractérisé par le critère BalProRu, puis l'inefficacité des PDI. Ces deux postes représentent d'après nos estimations 70 à 80 % de Nur. Il est donc possible d'envisager de pouvoir fournir, en fin de calcul d'une ration, un double diagnostic de l'adéquation entre apports et besoins à travers les deux critères suivants.

Le premier est basé sur le niveau global d'excrétion de Nur avec une suggestion d'échelle distinguant, compte tenu de la distribution fréquentielle des données, les situations d'excès modéré ($Nur > 0,30$ gNur/kgPV), d'excès important ($Nur > 0,40$ gNur/kgPV), de déficit modéré ($Nur < 0,20$ gNur/kgPV) et de déficit important ($Nur < 0,15$ gNur/kgPV). Au sein de cette échelle la zone recommandée est approximativement $0,20 < Nur \text{ g/kgPV} < 0,30$, voire même 0,25. La Figure 5 présente les différentes valeurs calculées de Nur entre les deux origines et pour les deux espèces. Chaque point représente un lot d'animaux. Les limites évoquées ci-dessus sont indiquées. Il apparaît clairement sur la Figure 5 qu'un même niveau de Nur/PV peut être obtenu avec différentes combinaisons des efficacités digestives et métaboliques. Par exemple, lorsque EffPDI = 67% on a Nur issu de ineffPDI ($Nur_{ineffPDI} \approx 0,15$ (sur l'échelle des X) et, pour cette valeur, Nur varie largement en fonction du critère Nur issu de BalProRu ($0,05 < Nur_{BalProRu} < 0,30$). C'est pour préciser cet aspect que le second critère de diagnostic est créé.

Le second niveau de diagnostic, à considérer en complément du précédent, est basé sur l'équilibre entre les deux principales origines des pertes Nur digestive ou métabolique. Chez des vaches et des chèvres recevant un large éventail de régimes différents ($n = 1201$) il apparaît que le rapport appelé RNUR = $Nur_{BalProRu} / Nur_{ineffPDI}$ est égal à $0,85 \pm 0,82$ avec une amplitude située entre -1 et 5 environ. Sur la base de ces résultats on estime qu'un régime correctement équilibré quant à ses origines de Nur doit avoir un rapport situé dans la zone $0,3 < RNUR < 1,0$. Si $RNUR > 1$ il y a un excès très important d'N fermentescible dans le rumen, si $RNUR < 0,3$ il y a un manque d'N fermentescible dans le rumen qui peut entraîner une baisse d'activité microbienne et de digestibilité du régime. La Figure 5 présente également les valeurs limites et recommandées de ce rapport RNUR. Notons que lorsque EffPDI = 67% et BalProRu = 0, Nur/PV cumulé des 2 origines représente environ 0,15 gNur/kgPV (soit environ 0,20 pour Nur/PV total).

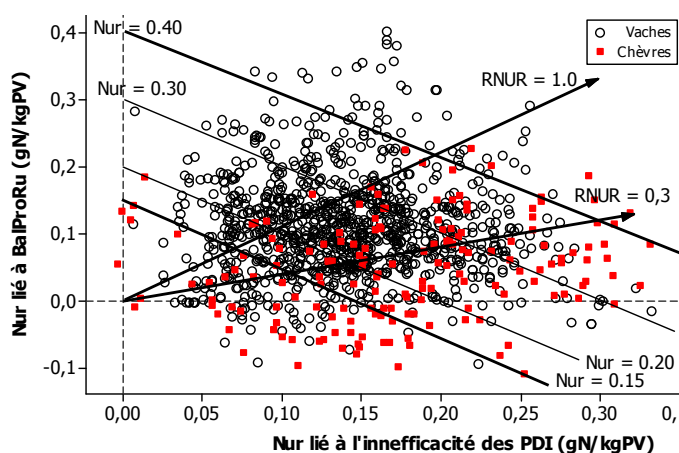


Figure 5 : Variations de la partition des origines de N urinaire entre BalProRu et l'inefficacité des PDI

Enfin, dans une partie des expériences conduites sur ces deux espèces on a pu disposer de la mesure de la teneur en urée du plasma ou du lait des animaux. Le traitement statistique de ces résultats permet d'indiquer que, lorsqu'on est dans la situation BalProRu = 0 et EffPDI = 67%, on a une concentration en N d'urée dans les fluides corporels située entre 115 et 120 mg/L.

CONCLUSION

Ce travail a permis de fournir, en complément des équations sur les flux digestifs et métaboliques azotés, une approche qui utilise directement les résultats des calculs de routine Systali pour prédire les flux de rejets azotés fécaux et urinaires. L'évaluation a montré que les estimations de ces deux flux sont précises. En outre, l'interprétation des résultats en fonction des origines permet de fournir un diagnostic de la ration en deux étapes, une quantitative sur le niveau global du rejet azoté et l'autre plus qualitative sur l'équilibre entre les origines digestive ou métabolique de Nur.

Chapoutot P, Nozière P and Sauvant D, 2013, Book of abstracts No. 19 of the 64th Annual Meeting of the EAAP, p. 138. WAP, the Netherlands.

Faverdin P., Vérité R., 1998. Renc. Rech. Ruminants, 5, 209-215

Peyraud J.L., Cellier P., Donnars C., Vertes F., 2014. Réduire les pertes d'azote dans l'élevage. Éditions Quæ Collection Matière à débattre et décider. 168 pp

Sauvant D., Nozière P., 2013, INRA Prod. Anim., 26, 327-346.

Sauvant D., P. Nozière P., 2016, Animal, 10:755-770.

Sauvant D., Cantalapiedra-Hijar G., Nozière P., 2014, Renc. Rech. Ruminants, 21, 131-134.

Sauvant D., Cantalapiedra-Hijar G., Delaby L., Daniel J.B., Faverdin P., Nozière P., 2015, INRA-PA, 28, 5, 347-368

Volden H., 2011. NorFor - The Nordic feed evaluation system. EAAP Publications No 130, Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 180p.