HAL open science

Actualisation des besoins protéiques des ruminants et détermination des réponses des femelles laitières aux apports de protéines digestibles dans l'intestin

Daniel Sauvant, Gonzalo Cantalapiedra-Hijar, Luc Delaby, Jean-Baptiste Daniel, Philippe Faverdin, Pierre Noziere

To cite this version:

Daniel Sauvant, Gonzalo Cantalapiedra-Hijar, Luc Delaby, Jean-Baptiste Daniel, Philippe Faverdin, et al.. Actualisation des besoins protéiques des ruminants et détermination des réponses des femelles laitières aux apports de protéines digestibles dans l'intestin. INRA Productions Animales, 2015, 28 (5), pp.347-368. 10.20870/productions-animales.2015.28.5.3038 . hal-01356580

HAL Id: hal-01356580

https://hal.science/hal-01356580v1

Submitted on 28 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

INRA Prod. Anim.,
2015, 28 (5), 347-368

Actualisation des besoins protéiques des ruminants et détermination des réponses des femelles laitières aux apports de protéines digestibles dans l'intestin

D. SAUVANT[1,2], G. CANTALAPIEDRA-HIJAR[3,4], L. DELABY[5,6], J.-B. DANIEL[1,2], P. FAVERDIN[5,6], P. NOZIÈRE[3,4]

[1] INRA, UMR791 MoSAR, 16 rue Claude Bernard, F-75005 Paris, France
[2] AgroParisTech, UMR791 MoSAR, 16 rue Claude Bernard, F-75005 Paris, France
[3] INRA, UMR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France
[4] Clermont Université, VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France
[5] INRA, UMR1348 PEGASE, F-35590 Saint-Gilles, France
[6] Agrocampus Ouest, UMR1348 PEGASE, F-35000 Rennes, France

Courriel : Daniel.Sauvant@agroparistech.fr

Optimiser l'efficacité d'utilisation des protéines est un enjeu fort de la nutrition des ruminants. La méta-analyse des données de la littérature permet d'améliorer la prévision des besoins et des réponses des ruminants aux apports protéiques. Ces nouvelles lois de réponses seront introduites dans la révision des systèmes d'alimentation pour les ruminants proposés par l'INRA.

Une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote constitue un défi de la nutrition des ruminants. En effet, il est connu que l'azote peut être un facteur limitant de l'activité des microorganismes du rumen et que des apports protéiques plus faibles que les besoins peuvent limiter l'ingestion et les performances des animaux (Vérité et Delaby 2000). Mais les aliments riches en protéines constituent une ressource qui est en partie importée et de plus en plus onéreuse. En outre, il est connu que les excès protéiques aboutissent à des rejets azotés accrus, notamment par la voie urinaire avec un éventuel risque pour l'environnement dans les zones sensibles. Enfin, l'augmentation des besoins en protéines animales de la population mondiale induit une compétition croissante sur l'utilisation des protéines végétales, qu'il convient d'optimiser de plus en plus. En conséquence, tous les systèmes d'unités protéiques des ruminants sont l'objet d'une attention particulière et régulièrement renouvelés.

En France, les systèmes basés sur les Matières Azotées apparemment Digestibles (MAD) ont été réformés dès les années 1970, et le système des Protéines Digestibles dans l'Intestin (PDI) proposé par l'INRA a été le premier système opérationnel c'est-à-dire proposant des valeurs cohérentes d'apports, de besoins et une méthode de calcul de régimes alimentaires correctement fournis en PDI (Jarrige *et al* 1978). Des actualisations successives ont été proposées en 1987 (Vérité *et al* 1987) et en 2007 (INRA 2007). Cependant ces actualisations n'étaient pas complètes au regard des nouvelles connaissances et certains points méritent d'être reconsidérés. Dans les pays étrangers, le système NRC nord-américain n'a pas évolué pour les bovins depuis 2001 (NRC 2001), mais est en cours de révision. En Europe des actualisations ont été proposées au cours de ces dernières années en Grande Bretagne (Thomas 2004), dans les pays du nord à travers le système « NorFor » (Volden 2011) et aux Pays-bas (Van Duinkerken *et al* 2011).

Il a donc été décidé, dans le cadre du projet INRA « Systali », de revisiter la question des besoins protéiques des ruminants et d'établir des lois de réponses de la production des protéines laitières et des rejets azotés urinaires en cohérence avec les variations des apports alimentaires de PDI. Ce dernier aspect ne sera considéré ici que pour les vaches et chèvres en lactation. Comme pour la révision du calcul des valeurs des aliments et des rations (Sauvant et Nozière 2013), la révision des besoins protéiques et la prédiction des réponses aux apports PDI s'appuie sur l'interprétation par méta-analyses de vastes bases de données expérimentales de l'INRA et de la littérature. Les définitions de chacune des variables utilisées dans les équations et les figures sont présentées dans le glossaire situé à la fin de l'article. Les unités des variables sont indiquées en indice dans les équations.

1 / Rappels des valeurs des besoins dans le système INRA 2007

1.1 / Besoins d'entretien

Dans les versions précédentes du système INRA, le besoin d'entretien PDI a été calculé sur des animaux proches de l'état d'entretien energétique et en se plaçant à la valeur nulle du bilan azoté (Jarrige *et al* 1978, Vérité *et al* 1987). Ceci présente l'intérêt d'avoir une valeur qui ne dépend que du poids vif (bovins 3,25 ; ovins 2,50 et caprins 2,30 g PDI/kg $PV^{0,75}$). En revanche, cette approche ignore les variations des pertes azotées endogènes fécales et urinaires qui sont fonction du niveau d'ingestion et du poids métabolique respectivement. Pour les animaux les plus performants à niveau

d'ingestion élevé, les besoins associés à ces dépenses non productives sont donc sous-estimés, ce qui entraine une surestimation de la disponibilité en PDI pour la production et en conséquence une sous-estimation de leur efficacité. Ces dépenses non pro- ductives ont été intégrées dans les principaux autres systèmes, par exemple les systèmes NRC (2001), « *Feed Into Milk* » (FiM, Thomas 2004), DVE/OEB (Van Duinkerken *et al* 2011) et NorFor (Volden 2011). En outre, cette situation de référence utilisée pour l'estimation des besoins d'entretien en PDI correspond à des régimes pauvres en azote, soit PDIN < PDIE. Les besoins PDI, ainsi calculés, ne tiennent pas compte du recyclage azoté important avec ces régimes. Cette situation particulière de mesure induit une sous-estimation du besoin PDI réel de l'organisme (qui correspond aux PDIE).

1.2 / Besoins de production

Le besoin lié à la production des protéines de lait suppose jusqu'alors que l'efficacité de la transformation des PDI disponibles pour le lait est constante et égale à 64% (Vérité *et al* 1987), valeur proche des 67 ou 68% proposés dans plusieurs pays (NRC 2001, Thomas 2004). Cependant, il est bien établi que ce rendement est variable et ce principe a déjà été intégré dans plusieurs systèmes récents (Volden 2011, Van Duinkerken *et al* 2011). Si les facteurs de variation de ce rendement sont globalement connus, leur quantification nécessitait une estimation plus précise des PDI disponibles pour la production, donc des besoins non productifs évoqués ci-dessus.

1.3 / Modifications envisagées

Les objectifs sont, dans un premier temps, de quantifier selon une approche factorielle les principaux flux et postes de pertes protéiques inévitables pour un ruminant. Celles-ci sont ensuite additionnées pour constituer les pertes protéiques non productives, à partir desquelles on calcule les besoins protéiques non productifs, exprimés en PDI (cf. partie 2). Dans un deuxième temps il s'agit de prévoir les réponses de la production du lait et de ses constituants aux variations d'apport des PDI (cf. partie 3). Sur cet aspect, un des points essentiels concerne la prise en compte d'un rendement variable des PDI pour les différentes fonctions de protéosynthèse corporelle, la synthèse des protéines laitières, mais également des protéines non productives. Enfin il s'agit, dans la continuité de l'étape précédente (Sauvant et Nozière 2013), d'appliquer les nouveaux principes de calculs pour prévoir plus précisément les rejets azotés urinaires (cf. partie 4). Les différentes bases de données considérées dans ce travail sont décrites dans le courant du texte et référencées si elles ont déjà servi de support à des travaux publiés.

2 / Les dépenses et besoins protéiques non productifs

La figure 1 résume les principaux flux azotés pris en compte dans ce travail. La partie digestive est très simplifiée au niveau du rumen pour tenir compte de la limitation graphique. Au niveau fécal, les trois flux, endogène, microbien et issus des protéines alimentaires sont mis en évidence. La partie métabolique considère le pool intermédiaire circulant d'azote (N) des acides aminés qui échange avec les tissus corporels (appelés N des réserves) et débouche sur trois flux majeurs de sortie : le lait, l'endogène fécal et les phanères. En outre, une partie de la fraction azotée de ces acides aminés circulants se retrouve sous forme d'urée après désamination hépatique et cet N uréique est majoritairement rejeté par la voie urinaire pour la plupart des situations alimentaires.

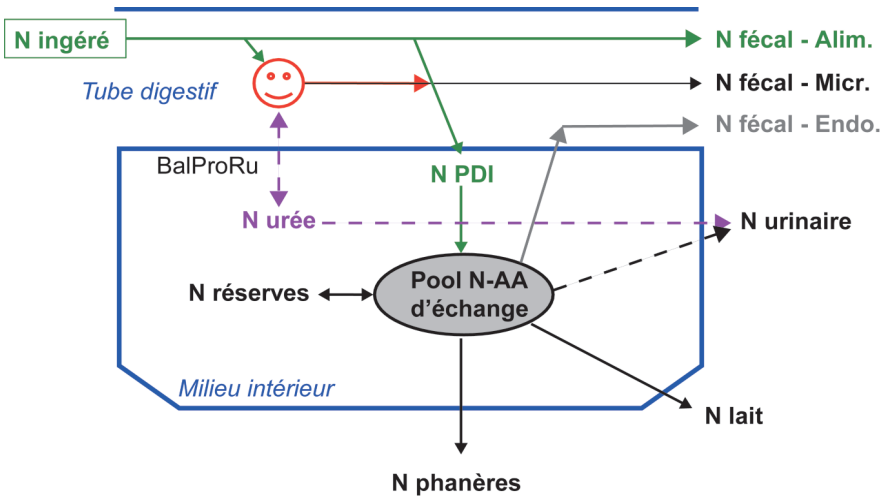
2.1 / Les protéines endogènes fécales

Le tube digestif est un lieu de digestion qui sollicite la sécrétion dans la lumière digestive de protéines pour assumer cette fonction. Une portion de ces protéines est réabsorbée, mais une portion n'est pas digérée et constitue ainsi une perte de protéines synthétisées dans l'organisme qui sont désignées comme Protéines Endogènes Fécales (PEF). Celles-ci proviennent notamment des secrétions enzymatiques digestives, des mucus, des desquamations de la paroi du tube digestif, etc. La question de l'évaluation de cette perte est déjà assez ancienne et il est admis depuis longtemps qu'elle est sous l'influence prépondérante de la fraction non digestible du bol alimentaire en transit (Schneider 1934) et par simplification de l'approche il a été suggéré d'indexer cette perte sur le niveau d'ingestion de matière sèche comme cela a été le cas en France par Terroine et Sorg-Matter (1927). Cependant l'expression en g N/kg MSI ne permet pas de prendre précisément en compte une influence de la nature de la ration. Dans le cas des ruminants, compte tenu du fait que les mesures des flux digestifs sont effectuées principalement aux niveaux duodénal et fécal et surtout que le flux d'N endogène n'y a pas la même signification, les systèmes protéiques proposés ont abordé la question de la quantification des flux d'N endogène à ces deux niveaux ainsi que nous le proposons ci-dessous.

a) Le flux azoté endogène au duodénum

Celui-ci correspond au drainage des réservoirs digestifs ainsi que de la partie haute de l'intestin grêle. Il a été quantifié lors de l'estimation des apports PDI comme correspondant au flux duodénal de matières azotées non ammoniacales et non microbiennes en situation d'apport de PIA nul. Il est égal à 14,2 g MAT/kg MSI, ou 2,3 g N/kg MSI (Sauvant et Nozière 2013). Cette valeur est un peu supérieure à l'estimation précédente (5,3 g N/kg MO non digestible, soit environ 1,7 g N/kg MSI, Vérité *et al* 1987) ainsi qu'à celle de 1,9 g N/kg MSI du NRC (2001). En revanche, le système récent NorFor (Volden 2011) se base sur une valeur de 4,8 g N/kg de MO au duodénum, soit en moyenne à 2,5 g N/kg MSI, valeur très proche de la proposition de Sauvant et Nozière (2013). Signalons également qu'avec l'emploi d'N^{15} Leucine, Ouellet *et al* (2010) rapportent un flux d'N endogène duodénal « libre » de 2,3 g N/kg MSI, valeur assez comparable à celles qui sont citées ci-dessus. En

Figure 1. *Schéma simplifié des principaux flux azotés en acides aminés (traits continus) et non protéiques (pointillé) chez les ruminants.*



revanche, ce travail intéressant a montré qu'environ 48% de l'N endogène duodénal se trouve piégé dans les protéines microbiennes élaborées dans le rumen et donc non pris en compte dans les approches citées ci-dessus. Ce résultat signifie que les valeurs proposées par les différents systèmes, même si elles sont globalement convergentes, sous-estiment assez largement l'endogène azoté vrai total au duodénum.

D'un point de vue physiologique, ce flux endogène azoté duodénal constitue à la fois un apport de protéines digestibles valorisables par l'animal, mais également une dépense en Acides Aminés (AA) qui génère donc un besoin en PDI. Dans le système PDI, cet N endogène a jusqu'à présent été ignoré en pratique, son calcul ne servant qu'à mieux préciser le calcul des protéines d'origine alimentaire (PIA) à partir des données *in sacco* (Vérité *et al* 1987) ainsi que des AA digestibles (AADI, Rulquin *et al* 1998). Au contraire, les systèmes NRC (2001) et NorFor (2011) ont intégré explicitement des apports et des besoins correspondant à l'endogène duodénal. Dans les lignes qui suivent on va chercher à les exprimer sous forme de PDI et décider de l'opportunité de les intégrer dans le cadre de la rénovation du système PDI.

Pour évaluer les apports en AADI liés à l'N endogène duodénal, il importe de connaître d'une part, la proportion d'N aminé (NAA) de cette fraction, et d'autre part, sa digestibilité réelle. En fonction des auteurs, la part d'N des acides aminés dans l'N endogène duodénal varie largement : de 0,94 (Larsen *et al* 2000) à 0,30 (Guilloteau *et al* 1986) en passant par 0,79 (Ørskov *et al* 1986), sachant que la proportion d'N protéique par rapport à l'ensemble du flux azoté se situe entre 0,55 et 0,60 selon Halbouche et Brun-Bellut (1995). La valeur retenue pour le NRC est de 0,5, ce qui est proche de la moyenne des estimations précédentes. Elle a aussi été retenue par NorFor et nous ne disposons pas d'éléments permettant de remettre en cause cette valeur. La digestibilité réelle de ces protéines endogènes a aussi fait l'objet de propositions diverses, 0,72 pour Larsen *et al* (2000), 0,60 pour Sandek *et al* (2001), 0,68 pour Ouellet *et al* (2002), 0,70 à 0,77 pour Ouellet *et al* (2010). Les systèmes en place ont également fait des propositions variées, 0,80 pour le NRC (2001) et 0,60 pour NorFor. Si on retient la valeur de 0,70, proche de la moyenne de ces propositions, l'apport en PDI lié à l'endogène duodénal atteint 5,0 g/kg MSI (= 2,3 × 6,25 × 0,5 × 0,7). Les systèmes NorFor et NRC aboutissent à une valeur moyenne très proche, de 4,7 et 4,8 g de protéines métabolisables/kg MSI, respectivement.

Pour l'estimation des besoins correspondant à cette dépense protéique endogène au duodénum, la question de la valeur de l'efficacité d'utilisation des PDI correspondant à cette dépense est posée. Dans le cas des systèmes NRC et NorFor (qui intègrent ce flux d'AA endogènes digestibles dans les apports), le besoin associé est estimé en admettant une efficacité d'utilisation de 0,67, appliquée soit à la fraction non digestible des AA endogènes au duodénum et de l'intestin grêle (NorFor 2011), soit à la fraction digestible du flux des AA endogènes au duodénum (NRC 2001). Cependant, ce flux ne constitue pas, comme les PDIA et les PDIM, un contributeur net aux apports de protéines puisqu'il provient d'une dépense protéique de l'organisme. En l'absence de connaissances quantitatives précises sur le cycle entéro-hépatique protéique endogène, il nous semble opportun de considérer, comme dans le système PDI précédent (Vérité *et al* 1987), que 100% de ce flux de PDI endogène sert à compenser le besoin lié à ce même flux. En conséquence, le flux protéique endogène au duodénum n'est utilisé que pour avoir une estimation non biaisée des PIA et des PIM. Seule la fraction non digestible du flux protéique endogène au duodénum est comptabilisée dans le calcul des besoins liée aux PEF.

b) La prédiction des pertes endogènes fécales

La prédiction des PEF à partir de la MO non digestible (MOND) a jusqu'à présent été intégrée dans le calcul des protéines alimentaires non digestibles dans l'intestin grêle (PANDI) utilisées pour estimer la digestibilité réelle des PIA ; elle était effectuée à partir de mesures de digestibilité dans l'ensemble du tube digestif (Vérité *et al* 1987), en estimant à partir de 135 données individuelles sur ovins les contributions respectives des fractions alimentaires et microbiennes aux matières azotées non digestibles (MAND) à partir des valeurs en PIA et Matière Organique Fermentescible (MOF) calculées à partir des tables :

$$\mathbf{MAND_{g/kgMSI} = 0{,}216\ PIA_{g/kgMSI} + 0{,}029\ MOF_{g/kgMSI} + 0{,}060\ MOND_{g/kgMSI}}$$

Dans le présent travail, pour être plus précis, seuls les travaux dans lesquels les flux duodénaux de Matières Azotées totales et Microbiennes (MAMic) ont effectivement été mesurés ont été retenus. Ainsi, 214 expériences (546 traitements - trt) issues de la base de données « *Bovidig* » sur la digestion des différents types de bovins (UMR MoSAR) ont été retenues. Elles ont permis d'estimer les trois composantes des matières azotés (6,25 × N) fécales non digestibles (MAND) : *i)* alimentaire (en fonction des matières azotées alimentaires PIA = totales – ammoniacales – microbiennes mesurées – endogène duodénal estimé à 14,2 g/kg MSI) ; *ii)* microbienne (MAMicND = 0,2 MAMic mesurées, valeur proposée par Jarrige *et al* 1978); *iii)* endogène fécale (en fonction de la MO Non Digestible, MOND, mesurée = 361 ± 72 g/kgMSI). La régression intra-expérience obtenue est :

$$\mathbf{MAND_{g/kgMSI} = 0{,}163\ PIA_{g/kgMSI} + MAMicND_{g/kgMSI} + [5{,}7 + 0{,}074\ MOND_{g/kgMSI}]}$$

(n_{exp} = 214, n_{trt} = 546, ETR = 2,9) **[1a]**

d'où

$$\mathbf{PEF_{g/kgMSI} = 5{,}7 + 0{,}074\ MOND_{g/kgMSI}}$$ **[1b]**

Cette équation suggère une digestibilité réelle (dr) de 83,7% pour les PIA. Dans le cadre du calcul, avec les équations Systali, de 1 304 rations de vaches laitières (bases « *Bovidig* + *MoSARCO* »), on aboutit à une dr des PIA de 82,4 ± 5% qui est très proche de l'estimation *in vivo* de l'équation [1a] et renforce ainsi son bien-fondé. Une autre estimation des PEF a été réalisée, avec un peu moins de données de la base « *Bovidig* » en utilisant la fraction NDF non digestible *in vivo* (NDFND) qui est moins corrélée aux MAND que MOND :

$$\mathbf{MAND_{g/kgMSI} = 0{,}189\ PIA_{g/kgMSI} + MAMicND_{g/kgMSI} + [17{,}5 + 0{,}050\ NDFND_{g/kgMSI}]}$$

(n_{exp} = 180, n_{trt} = 464, ETR = 3,1) **[2a]**

d'où

$$\mathbf{PEF_{g/kgMSI} = 17{,}5 + 0{,}050\ NDFND_{g/kgMSI}}$$ **[2b]**

Sur la base « *Bovidig* », largement utilisée pour la mise au point du calcul des apports PDI (Sauvant et Nozière 2013), les équations **[1b]** et **[2b]** aboutissent à des valeurs des PEF égales en moyenne et positivement corrélées entre elles (R^2 = 0,60). En revanche, l'étendue des valeurs obtenues est plus faible avec l'équation **[2b]** comme le montre les valeurs des écart-types (4,23 ± 0,48 *vs* 4,25 ± 0,77 g N/kg MSI). Par ailleurs, les coefficients des termes PIA et MOND de l'équation proposée en 1987 et, citée plus haut, sont assez proches de ceux de l'équation **[1a]**. Pour la fraction microbienne, les coefficients des équations de 1987 et de l'équation **[1a]** sont également cohérents entre eux et avec un niveau de synthèse microbienne de 23,2 g N microbien/kg MOF, valeur retenue en 1987 pour le calcul des PDIME. Avec l'équation **[1b]**, on dispose d'une estimation de N endogène fécal qui correspond à 4,25 ± 0,77 et 4,49 ± 1,04 gN/kgMSI avec les données des bovins (*Bovidig*) et des ovins (base « *Ovidig* », UMR Herbivores), respectivement.

Pour évaluer le besoin en PDI_{PEF} correspondant à la dépense liée aux PEF, la teneur en NAA de N fécal endogène de même que l'efficacité d'utilisation des PDI pour soutenir cette fonction doivent être estimées, comme cela est fait dans certains autres systèmes. Cela suppose que la fraction non aminée de l'endogène fécal ne génère pas de besoin PDI. Cette hypothèse pourrait être discutée si des données expérimentales permettaient de le faire. Les choix ne sont pas clairement explicités, ni dans le NRC (2001) ni dans le Cornell-CNCPS (Fox *et al* 2004), mais leurs calculs des besoins en protéines métabolisables se basent sur l'ensemble de l'N endogène fécal (sans discriminer la fraction aminée) avec une efficacité de 1. Cette approche revient à considérer que tout l'azote endogène perdu dans les fèces va créer un besoin en PDI qu'il soit sous forme aminé ou pas. Dans le système hollandais DVE/OEB_{2010} (Van Duinkerken *et al* 2011), la détermination du besoin est basée sur la totalité de l'N endogène fécal estimé à partir de la MS fécale (50 g MA/kg MS fécale), avec une efficacité associée de 0,67. Le système NorFor (Volden 2011) suppose une proportion d'NAA de 50% pour l'ensemble de N endogène fécal, et considère une efficacité de 0,67 pour les fractions provenant du duodénum et de l'intestin grêle, alors qu'elle est de 1 pour les fractions provenant du gros intestin. Récemment, Lapierre *et al* (2014) ont supposé que cette proportion d'NAA était de 80% de N total, selon la moyenne observée pour les sécrétions endogènes mesurées à l'iléum chez le porc (Jansman *et al* 2002) et les observations de Ørskov *et al* (1986) et de Larsen *et al* (2000) pour les sécrétions endogènes fécales les chez le bovin. La proportion d'NAA de 50% semble être un peu faible, quoique Larsen *et al* (2000) ont bien montré que la proportion d'NAA au niveau fécal était plus faible qu'au niveau duodénal (0,54 *vs* 0,94). En outre ce choix affecte directement les besoins en PDI car on suppose que la fraction non aminée ne génère pas de besoin en PDI, cependant nous suggérons de l'adopter faute d'éléments permettant de la contester précisément. Avec cette hypothèse et l'équation **[1b]** appliquée aux vaches de la base « *Bovidig* » produisant en moyenne 850 g de protéines laitières/j, la dépense protéique (6,25 N) liée aux PEF est égale en moyenne à 265 g/j, soit 31% de la sécrétion protéique laitière ce qui n'est pas négligeable. Par ailleurs, la valeur du coefficient d'efficacité des PDI_{PEF} ne semble pas être précisément documentée. Swanson (1977) proposait la valeur de 0,67, largement reprise par les autres systèmes, cependant c'était pour les veaux non sevrés, alors que c'est une efficacité de 0,45 qui était proposée pour les ruminants adultes, valeur qui n'a jamais été reprise par les autres systèmes. En outre, pour le NRC (2006), le rendement proposé est de 0,67 pour les ovins, mais de 1 pour les caprins. Nous suggérons de retenir la valeur référence de 0,67, sachant qu'en pratique cette valeur sera largement variable à travers le processus de calcul des valeurs PDI des rations et des réponses animales (cf. partie 3.2 et 3.3). Tout ceci aboutit donc à calculer les PEF en g/j, à partir de l'équation **[1b]** ci-dessus :

$$\mathbf{PDI_{PEFg/j} = MSI_{kg/j} \times [0{,}5 \times (5{,}7 + 0{,}074 \times MOND_{g/kgMSI})] / 0{,}67} \quad [3]$$

Cette équation correspond en moyenne à des valeurs de besoins en PDI_{PEF} de 19,8 ± 3,7 (base « *Bovidig-PDI* »), et 20,9 ± 4,6 (base « *Ovidig* ») g PDI_{PEF}/kg MSI. Nos propositions sont en moyenne un peu inférieures à celles du NRC (2006) pour les ovins (22,7 g PDI/kg MSI) et les caprins (26,7 g PDI/kg MSI), peut être en raison des différences de dMO entre les régimes moyens. Pour les bovins, sur la base « *Bovidig-PDI* », sur 400 traitements environ, les valeurs correspondantes sont un peu plus faibles pour NorFor (18,2 ± 3,4), mais un peu plus élevées pour le NRC (23,5 ± 0,5) et le système DVE/OEB des Pays Bas (23,1 ± 5,4). La faible variabilité des valeurs obtenues avec le NRC indique que la qualité de la ration y est moins prise en compte. Par ailleurs, le système de Cornell-CNCPS (Fox *et al* 2004), qui considère l'N microbien non digestible et l'N non aminé dans les PEF, aboutit à des valeurs nettement supérieures (38,0 ± 8,9) compte tenu des hypothèses faites. Notons enfin que dans une synthèse récente basée sur la technique de dilution isotopique chez la vache laitière, Lapierre *et al* (2014) suggèrent un besoin de 19 g PDI_{PEF} /kg MSI, valeur très proche de ce que nous proposons bien que les paramètres intermédiaires de calculs soient sensiblement différents. Cette diversité entre systèmes traduit bien la difficulté technique de faire ces mesures chez le ruminant, le manque de connaissances spécifiques sur le sujet et les débats scientifiques en cours sur les hypothèses retenues par les uns et les autres.

2.2 / Les pertes azotées urinaires endogènes

a) Le point des connaissances

La perte endogène urinaire n'était pas explicitement prise en compte dans les systèmes PDI précédents. Elle a été classiquement définie dans les autres systèmes comme la perte azotée dans les urines chez un animal recevant un régime protéiprive mais suffisant en énergie. En fait, cette mesure était réalisée, à l'origine, juste avant la débâcle azotée qui précède la mort de l'animal. Il s'agit donc d'une perte azotée minimale, estimée avec des animaux en sous-nutrition azotée totale incompatible avec une vie productive et un état de bien-être. Ultérieurement d'autres expérimentations ont été conduites avec des animaux recevant un régime très pauvre en azote. Swanson (1977) a rassemblé ce type d'études conduites sur des bovins, cependant les teneurs en Protéines Brutes (PB) des régimes considérés n'ont pas été citées, elles seraient de l'ordre de 1 à 2% MSI d'après les régimes décrits par cet auteur. Dans le contexte actuel il semble important de définir une perte azotée urinaire minimale correspondant à un animal placé expérimentalement dans des conditions physiologiques suffisamment « normales » pour survivre et être admissibles en termes d'éthique. En outre, il semble important que cette dépense puisse être plus précisément définie en termes de calculs.

La perte d'N endogène urinaire a été l'objet de nombreuses investigations au XXème siècle, selon Jarrige *et al* (1978), elle varie entre 0,10 et 0,25 g Nue/kg $PV^{0,75}$ et elle diminue avec l'âge. Il convient de remarquer que la plupart de ces travaux étaient conduits sur des animaux monogastriques de petite taille et que la comparaison stricte entre monogastriques et ruminants n'a jamais été faite à notre connaissance. La proposition de prévision multi-espèces de Brody (1945), de Nue (g/j) = 0,146 $PV^{0,72}$ était sensiblement inférieure à celles de Terroine et Sorg-Matter (1927), ajustées à 0,201 $PV^{0,72}$, et elle a été longtemps utilisée. Les valeurs proposées par les différents systèmes actuels font en général référence à Swanson (1977) qui a proposé l'équation Nue (g/j) = 0,44 $PV^{0,50}$ à partir de mesures sur bovins avant et après sevrage recevant des régimes très pauvres en protéines. Dans ce travail, la pente de l'équation en log_{10} (qui correspond à la puissance du PV) n'est que de 0,50, valeur notablement plus faible que celle de Brody (1945). A propos du travail de Swanson (1977) on peut s'interroger sur l'influence de données obtenues pour les faibles PV sur des veaux recevant du lait et présentant des valeurs élevées d'N urinaire. Mais ce biais potentiel dans les données n'a malheureusement pas été étudié par cet auteur à travers un traitement statistique adéquat puisqu'il s'agit d'une régression globale sans aucune distinction intra espèce ou intra expérience. Par ailleurs, dans cette étude, des données individuelles et de groupe ont été mélangées et, de plus, une bonne partie des traitements candidats utilisés par les auteurs précédents ont été retirés sans argumentation très précise. Pour les bovins, le NRC (NRC 2001) a repris la proposition de Swanson (1977) qui a aussi été reprise dans les systèmes européens sans être vraiment discutée (Thomas 2004, Volden

2011, Van Duinkerken *et al* 2011). Pour les ovins (NRC 2006), on a Nue (g/j) = (3,375 + 0,147 PV) / 6,25 et pour les caprins (NRC 2006), Nue = 0,165 $PV^{0,75}$. En outre, dans ces propositions du NRC, le rendement métabolique des PDI considéré est de 0,67 pour les bovins et les ovins mais de 1 pour les caprins.

b) Approche basée sur la relation entre N urinaire et poids vif dans le cas de régimes à faible taux azoté

Pour actualiser la valeur de Nue, nous n'avons retenu que des résultats issus de mesures effectuées sur des animaux placés en conditions d'élevage et ne recevant pas de régime synthétique. Dans un premier temps nous avons utilisé les nombreuses données de bilans azotés sur bovins, ovins et caprins en croissance, ou à l'entretien, de la base URZ (Salah *et al* 2014). Outre la diversité animale, cette base présente l'intérêt de comprendre de nombreux traitements à faible taux protéique. Les valeurs de N urinaire (NUR) y sont parfois inférieures aux valeurs de 0,10 – 0,25 g Nue/$PV^{0,75}$ évoquées ci-dessus. Sur ces données, les traitements les plus pauvres en MAT ont été sélectionnés (MAT < 100 g/kg MS, soit MAT = 75 ± 20 g/kg MS) et, dans ce cas, la régression globale entre les log_{10} de PV et NUR est :

$$\textbf{Log NUR}_{g/j} \textbf{= - 1,050 + 0,99 log PV}_{kg}$$
(n = *197*, R^2 = 0,68, ETR = 0,25) **[4a]**

En étant encore plus restrictif, c'est-à-dire en ne conservant que les régimes avec MAT < 75 g/kgMS, soit MAT = 58 ± 15 g/kgMS, on a une relation statistiquement non différente de la précédente :

$$\textbf{Log NUR}_{g/j} \textbf{= - 1,174 + 1,00 log PV}_{kg}$$
(n = *76*, R^2 = 0,86, ETR = 0,21) **[4b]**

Selon ces deux relations, les rejets d'N urinaire des ruminants recevant des régimes pauvres en MAT sont proportionnels à PV^1 et non à $PV^{0,72}$ (Brody) ou à $PV^{0,50}$ (Swanson 1977).On aboutit à partir de l'équation **[4b]** à une relation simple et commune aux trois espèces des pertes azotées urinaires « minimales » de ruminants recevant des régimes très pauvres en azote :

$$\textbf{NUR}_{g/j} \textbf{= 0,067 × PV}_{kg} \textbf{ [5]}$$

Notons que le même type d'ajustement appliqué uniquement aux 21 données de ruminants (13 ovins et 8 bovins) utilisés dans le travail de Brody (1945) aboutit à l'équation :

$$\textbf{Log NUR}_{g/j} \textbf{= - 1,173 + 0,90 log PV}_{kg}$$
(n = *21*, R^2 = 0,86, ETR = 0,13) **[4c]**

Les constantes de cette équation **[4c]** sont égales à celles des équations **[4a]** et **[4b]**, tandis que les pentes ne sont pas statistiquement différentes, notre proposition n'est donc pas différente de ce qu'on obtient pour les ruminants avec les données de Brody (1945).

c) Approche basée sur la relation entre N urinaire et N digestible ingéré

Une démarche alternative, mais plus facile à définir, a consisté à supposer que l'animal à l'entretien azoté « minimal » est celui pour lequel l'excrétion d'N fécal (NF) est égale à l'N ingéré (NI – NF = N digestible apparent ingéré = NDI = 0). Dans ce cas BalProRu est égale à la digestion apparente du flux protéique duodénal dans les intestins (figure 1). Dans cette situation, avec la base « *Bovidig* », la teneur en MAT du régime est de l'ordre de 40 g/kg MS, celle de N-NH_3 dans le jus de rumen est un peu inférieure à 20 mg/L et le critère BalProRu mesuré est de l'ordre de -50 g/kgMS, indiquant un recyclage d'urée dans le rumen largement dominant. Cette hypothèse est cohérente avec le fait que, pour cette teneur de 40 g/kg MS en MAT du régime, l'urée est massivement recyclée vers le tube digestif aux dépends de la perte urinaire. Harmeyer et Martens (1980) l'ont mis en évidence depuis longtemps, plus récemment Reynolds et Kristensen (2008) ont proposé une équation indiquant que dans nos conditions (avec NDI/PV = 0), 98% de l'urée circulante serait recyclée dans le tube digestif. Ce faciès nutritionnel correspond à un déficit azoté permettant à l'animal de survivre grâce un remarquable processus adaptatif.

Dans ces conditions, l'excrétion d'NUR se rapprocherait de la perte endogène, même si elle comprend en principe une petite partie liée à l'inefficacité des PDI pour les PEF de ces mêmes animaux en relation avec leur ingestion non nulle. Cette situation existe également dans les essais utilisés par Brody (1945) et par Swanson (1977). Ces auteurs n'ont pas estimé cette fraction. Cependant, avec la base « *Bovidig* », lorsque l'on calcule les PEF avec l'équation **[1b]**, pour des traitements avec la dMO mesurée *in vivo*, et qu'on tient compte d'une relation négative associant l'efficacité des PDI et NDI/PV on estime que cette fraction de NUR/PV liée à l'inefficacité des PDI serait potentiellement de l'ordre de 0,018 g NUR/PV lorsque NDI/PV = 0. Cette valeur n'est cependant pas robuste dans la mesure où on ne connaît pas précisément l'efficacité des PDI lorsque NDI/PV = 0.

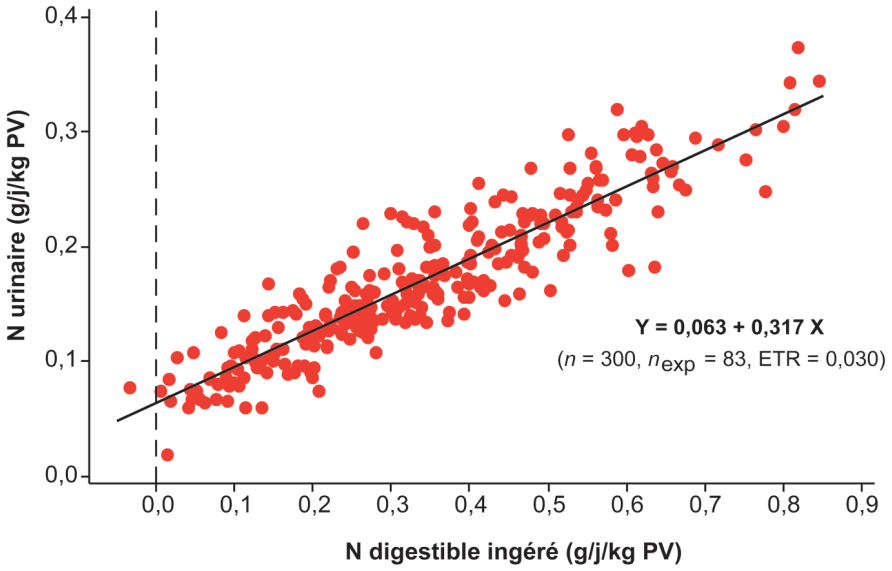
En pratique, cette démarche alternative consiste à mettre en relation le NUR et l'N digestible apparent ingéré, et à calculer l'ordonnée à l'origine. Lorsque cette approche est pratiquée sur la même base URZ, on obtient la régression intra-expérience (figure 2) :

$$\textbf{NUR/PV}_{g/j/kgPV} \textbf{= 0,063 + 0,317 NDI/PV}_{g/j/kgPV}$$
(n_{exp} = 83, n_{trt} = 300, ETR = 0,030) **[6a]**

Il n'y a pas d'effet espèce sur l'ordonnée à l'origine ni sur la pente de cette relation qui est donc générique. Sur la base « *Ovidig* » une approche comparable aboutit aussi à une relation très proche de la **[6a]**, en particulier pour l'ordonnée à l'origine :

$$\textbf{NUR/PV}_{g/j/kgPV} \textbf{= 0,064 + 0,431 NDI/PV}_{g/j/kgPV}$$
(n_{exp} = 41, n_{trt} = 126, ETR = 0,033) **[6b]**

Figure 2. *Relation entre l'N urinaire et l'N digestible ingéré (Base URZ, Salah* et al *2014).*



Base de Nizar *et al* (URZ)

En définitive, les équations **[6a]** et **[6b]** convergent vers la valeur suggérée plus haut de 0,067 g NUR/kg PV (équation **[5]**) comme perte azotée urinaire minimale en utilisant une approche et des données différentes. Cette perte comprend toutefois une fraction azotée d'origine microbienne qu'il convient de soustraire car elle ne crée pas de besoin en PDI.

d) Quantification de la fraction N non protéique d'origine microbienne

Une partie de l'N urinaire « minimal » ainsi calculé ne provient ni du renouvellement protéique de l'organisme ni de l'inefficacité des PDI pour les PEF de ces animaux, mais des substances azotées non protéiques des microorganismes du rumen (voire également d'autres substances azotées) absorbées, non susceptibles de contribuer au recyclage d'urée et excrétées dans l'urine. Si on accepte que le ratio N-purine / N-total dans les microorganismes du rumen est de 11,6% (Chen *et al* 1990, Chen et Gomes 1992) et que la digestibilité réelle (dr) de ces bases puriques est de 80% avec un taux de récupération d'N purique absorbé en N purique urinaire de 85% (Chen et Gomes 1992, Tas et Susenbeth 2007), il est alors possible de réaliser une estimation de l'N urinaire provenant de l'N non protéique des microorganismes du rumen (NNPMicUR). Les flux azotés correspondant à ces aspects n'ont pas été indiqués sur la figure 1 dans un souci de clarté.

$$\mathbf{NNPMicUR/PV_{g/j/kgPV} = Nmic/PV_{g/j/kgPV} \times 0{,}116 \times 0{,}8 \times 0{,}85}$$

Avec cette hypothèse, le traitement des données de « *Bovidig* » aboutit à une équation curvilinéaire décroissante de NUR/PV, qui permet de calculer la proportion d'N non protéique microbien dans l'N urinaire (NNPMicUR/NUR) :

$$\mathbf{NNPMicUR/NUR_{g/g} = 0{,}3325 / (1 + ((NUR/PV_{g/j/kgPV}) / 0{,}203))}$$
($n = 112$, ETR = 0,0202) **[7a]**

Sur la base de cette équation **[7a]**, lorsque NUR/PV = 0,067 (cf. équation **[5]**) alors NNPMicUR/NUR = 25%. En conséquence, la perte ou dépense minimale d'N urinaire corrigée à retenir (Nue) est :

$$\mathbf{Nue_{g/j} = 0{,}067 \times (1 - 0{,}25) \times PV = 0{,}050\ PV_{kg}}\ \mathbf{[7b]}$$

e) Evaluation de la proposition de calcul de Nue sur des données externes

Ces valeurs ont été confrontées à d'autres bases de données et à des animaux laitiers, notamment de la base « *Bovidig* ». Dans cette base, nous disposons de 186 mesures de bilans N effectués sur des bovins. La figure 3 montre l'excrétion d'NUR corrigée de la fraction purique microbienne selon l'équation **[7a]** (NURcor) en fonction de l'N digestible ingéré. Un ajustement exponentiel intra-expérience des données (figure 3a) aboutit à une intersection de 0,087 g NURcor / kg PV (quasi égale à celle de 0,085 obtenue sur « *Ovidig* » avec le même type d'approche, $n = 113$, $n_{exp} = 38$, ETR = 0,033), valeur sensiblement supérieure à la valeur de 0,050 g NURcor/kg PV. Cependant, la figure 3b qui présente séparément les différentes expériences au sein de cette même relation, révèle que les pentes des expériences présentant les valeurs NDI/PV les plus faibles sont supérieures à la pente moyenne obtenue par l'ajustement global et convergent vers une valeur sensiblement égale à 0,05 g NURcor/kg PV.

Ces résultats obtenus sur différents types de bovins viennent renforcer la pertinence du choix d'une perte endogène urinaire de 0,050 g Nue/kg PV.

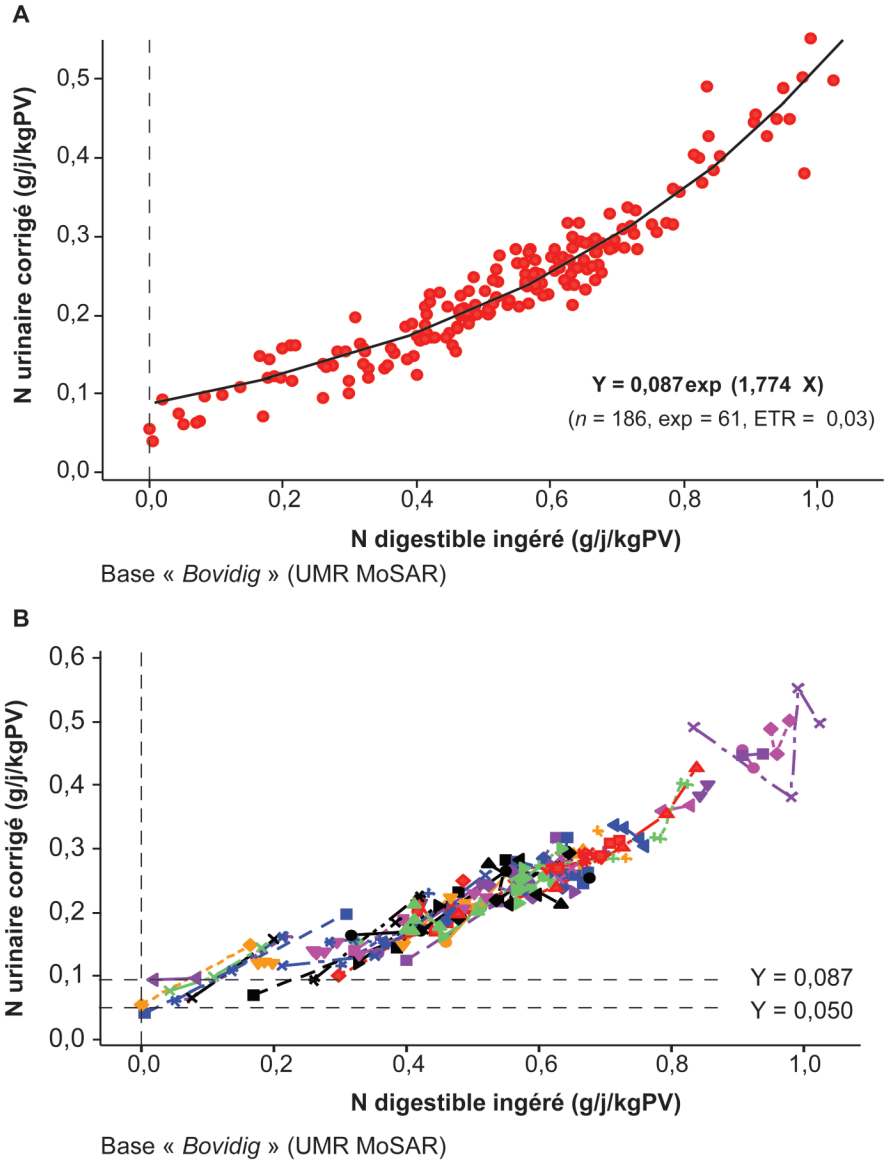
f) Besoin en PDI associé aux pertes urinaires endogènes

Si on suppose une efficacité de 1 pour les besoins en PDI associés puisqu'il n'y a pas de dépôt net, on aboutit à une estimation «multi-espèces» du besoin d'entretien en PDI lié aux pertes urinaires :

$$\mathbf{PDIURE_{g/j} = 0{,}05 \times 6{,}25/1 \times PV_{kg} = 0{,}312\ PV_{kg}}\ \mathbf{[8]}$$

Comparée aux autres systèmes, la présente proposition aboutit à des besoins en PDIURE plus élevés. Ainsi avec la base « *Bovidig* » la valeur moyenne calculée est de 155 ± 47 g PDIURE/j, alors

Figure 3. *Excrétion de l'N urinaire corrigée des bases puriques en fonction de l'N digestible ingéré (Base « Bovidig »).*
A. Relation moyenne intra expérience, ajustée de l'effet essai.
B. Relations intra-expérience individualisées par expérience.



qu'avec les mêmes régimes l'approche du NRC pour les bovins conduit à une valeur de 90 ± 15 g PDIURE/j. Cette différence est logique puisque l'animal de référence pour le calcul n'est pas comparable, à savoir un niveau d'ingestion d'N digestible nul pour Systali *vs* un niveau d'N total quasi nul, mais non quantifié précisément (Swanson 1977), pour les autres systèmes.

Pour les petits ruminants, notre proposition aboutit, pour les ovins, à des valeurs de besoins en PDIURE assez proches des propositions du NRC (2006) jusqu'à 100 kg PV environ. Pour les caprins nos propositions aboutissent à des besoins en PDIURE inférieurs d'environ 5 g PDI/j aux propositions du NRC (2006) et de l'AFRC (1998).

2.3 / Les pertes de protéines par les phanères

Ces pertes ne représentent que de l'ordre de 2 à 5% des dépenses azotées non productives (NRC 2001 et 2006). Faute de nouvelles données il a été décidé d'appliquer la valeur de 0,2 g de protéines/j/kg $PV^{0,6}$ proposée par Swanson (1977) et reprise par la plupart des systèmes étrangers, et une efficacité de référence de 67% des PDI associés. Cette efficacité est en fait variable, cet aspect sera discuté plus loin. A ce stade on a donc le besoin correspondant :

$$\mathbf{PDI_{PHA}}_{g/j} = \mathbf{0,2\ PV_{kg}^{0,6} / 0,67\ [9]}$$

2.4 / Comparaison des niveaux de besoins avec les autres systèmes

Le besoin en PDI total lié aux dépenses protéiques non productives (PDIDNP) est égal à la somme des équations **[3]**, **[8]** et **[9]** :

$$\mathbf{PDI_{DNPg/j} = PDI_{PEFg/j} + PDI_{UREg/j} + PDI_{PHAg/j}}$$

Les nouvelles hypothèses de calcul des besoins en PDIDNP aboutissent, par rapport aux besoins INRA 2007, à des valeurs d'autant plus fortes que le niveau de production est élevé, le rapport entre les deux expressions du besoin en PDI est en moyenne de 1,5 et peut dépasser 2 pour les animaux les plus productifs comme les femelles laitières, ayant un poids vif et une MSI élevés. Par rapport aux autres systèmes en vigueur, les propositions de besoins en PDI non productifs sont assez proches. Ainsi, sur les régimes de la base « *Bovidig* », avec des mesures de digestibilité *in vivo*, et en supposant une efficacité fixe des PDI (67%), nos propositions aboutissent en moyenne à 427 ± 185 g PDIDNP/j alors que pour les mêmes régimes, le NRC (2001) et les systèmes britannique (Thomas 2004) et hollandais (Van Duinkerken *et al* 2011) conduisent à une moyenne de 406 ± 182 g PDIDNP/j. Une moyenne plus faible est obtenue avec le système NorFor (356 ± 155 g PDIDNP/j) ; en revanche une valeur moyenne nettement plus forte est obtenues avec le système CNCPS (601 ± 291 g PDIDNP/j). Dans la suite de l'article nous verrons que ce besoin en PDIDNP peut varier assez largement en fonction de l'efficacité d'utilisation des PDI.

3 / Les besoins en protéines pour la production laitière et les réponses laitières des vaches et des chèvres aux apports protéiques

3.1 / Description des réponses observées et des paramètres associés

Différents auteurs ont montré que la réponse laitière, ou de production de protéines, des vaches laitières est curvilinéaire, selon une loi des rendements marginaux décroissants, au taux azoté du régime (Journet *et al* 1983), au bilan protéique (Vérité *et al* 1997) ou à la concentration en PDI de la ration (Vérité et Delaby 1998 et 2000). La figure 4a présente l'allure moyenne de cette réponse et les paramètres qui s'y attachent en particulier les efficacités moyennes (EffPDI) et marginales (EffMargPDI) d'utilisation des PDI disponibles = PDI ingérés – PDIDNP – besoin PDI associé au bilan protéique corporel s'il est positif (ou + apport PDI si ce bilan est négatif, voir plus loin). La figure 4b présente les valeurs ajustées de ces réponses pour un ensemble de 295 expériences portant sur l'influence du niveau d'apport des PDI.

Cette figure 4b est issue du traitement des bases de données « *Bovidig-PDI* » et « *MoSARCO* » rassemblées (cf. description dans le paragraphe 3.2/b). L'ajustement par une fonction quadratique de la production des protéines (MPobs) en intra-expérience en fonction de l'apport de PDI disponibles est :

$$\mathbf{MPobs_{g/j} = 272,9 + 0,60\ PDIdisp_{g/j} - 0,00007\ PDIdisp_{g/j}^2}$$

(n = 867, n_{exp} = 295, ETR = 39,2) **[10a]**

D'après cette équation *l'efficacité marginale des PDI disponibles* (figure 4a), qui est la dérivée de la régression [10a], est une fonction décroissante du niveau de PDIdisp :

$$\mathbf{dMPobs/dPDIdisp_{g/g} = EffMargPDI_{g/g} = 0,60 - 0,00014\ PDIdisp_{g/j}\ [10b]}$$

Sur l'ensemble des données considérées, l'EffMargPDI est en moyenne de 40,7 ± 1,3% ; elle diminue de 50 à 30% environ lorsque la quantité de PDI disponibles augmente entre de 750 à 2000 g/j. Ces valeurs moyennes du paramètre EffMarg PDI sont nettement supérieures aux moyennes de 20% proposés par l'AFRC (1993). Elles sont également supérieures au 24% proposés par Cant (2005) à partir de l'ajustement linéaire des données de Vérité *et al* (1987). En revanche, le système FiM (Thomas 2004) a suggéré des efficacités marginales de 30, 46 et 70% des protéines métabolisables disponibles en protéines de lait pour des groupes de régimes représentant des niveaux d'apport protéique qualifiés respectivement d'adéquat (> 102% du besoin), de marginal (de 98 à 102%) et de déficient (< 98%). Ces derniers résultats sont cohérents avec les nôtres, ils seront précisés plus loin en fonction de la disponibilité simultanée en énergie.

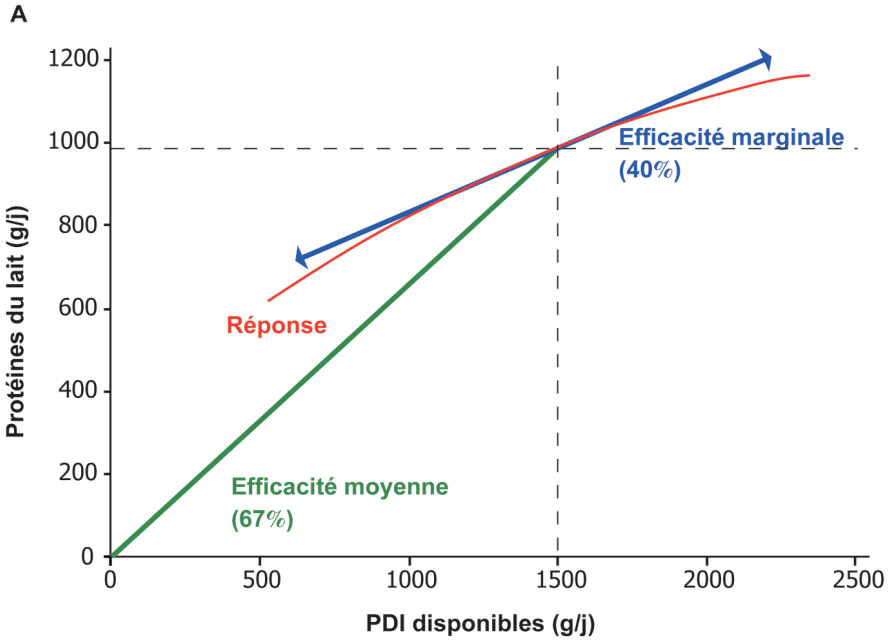
L'autre paramètre relatif à l'efficacité est *l'efficacité moyenne des PDI disponibles* (EffPDI = Protéines de lait/PDI disp). La figure 4b illustre par les différences de pentes le fait qu'on a systématiquement EffPDI > EffMargPDI. Par ailleurs, la figure 4b, sur laquelle les EffPDI de 50, 67 et 80% ont été indiquées, montre bien que l'EffPDI est dépendante, d'une part, négativement du niveau des PDIdisp, très lié à la teneur en PDI du régime et, d'autre part, positivement du niveau de production de protéines du lait pour un niveau donné d'apport de PDIdisp ce qui n'est pas le cas du paramètre EffMargPDI. L'encadré 1 présente graphiquement la différence de calcul entre les propositions du système INRA 2007 et la présente proposition. En 2007 on avait théoriquement EffPDI = 64%, à valeur fixe, et un besoin d'entretien constant alors le nouveau système propose une efficacité variable qui s'applique à la fois au lait, aux dépenses protéiques non productives (excluant les pertes endogènes urinaires), et au bilan protéique corporel (cf. 3.2/a).

3.2 / Variations et prédiction de l'efficacité moyenne d'utilisation des PDI

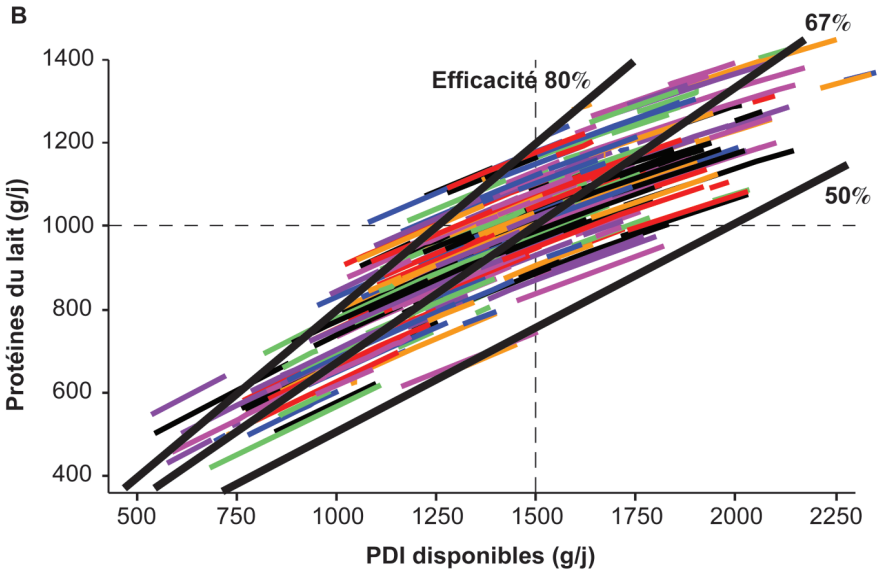
a) Démarche appliquée

Les données et les critères retenus. Un sous-ensemble de la base « *Bovidig* », sélectionné pour ne comporter que des essais focalisés sur l'influence quantitative et qualitative des protéines, a été nommé « *Bovidig-PDI* » (nombre d'expériences, n_{exp} = 54 ; nombre de traitements, n_{trt} = 140, Sauvant *et al* 2014). De manière à obtenir des modèles plus robustes, cette première base de travail a été élargie avec un ensemble de données

Figure 4. *Réponse moyenne de la production et de l'efficacité aux variations d'apport des PDI disponibles (**A**) et réponses ajustées de l'effet expérience et de la réponse intra-expérience observées pour un ensemble d'expériences focalisées sur l'influence du niveau d'apport des PDI (**B**).*



Calcul à partir de la base « *Bovidig-PDI* », essais sur le niveau d'apport PDI



Bases « *Bovidig-PDI* » et « *MoSARCO* » (UMR MoSAR)

expérimentales obtenues sur vaches laitières pour constituer la base « *MoSARCO* » en ne sélectionnant, pour le présent travail, que les expériences où le facteur expérimental étudié était l'apport de PDI seul (n_{exp} = 239, n_{trt} = 638), ou bien combiné avec l'apport d'énergie (n_{exp} = 297, n_{trt} = 887). Une autre base de données, issue des travaux sur la nutrition azotée des vaches laitières conduits par l'UMR Pegase (INRA Rennes) et comportant des données d'ingestion et de production individuelles (n_{exp} = 6, n_{trt} × stade de lactation = 191, n données = 483 trt × vaches) a été mobilisée afin de conforter les approches réalisées à partir des bases « *Bovidig* » et « *MoSARCO* ». Pour les chèvres laitières un sous-ensemble de la base « *Caprinut* » de l'UMR MoSAR a été sélectionné pour ne comporter que des expériences portant sur l'apport quantitatif et qualitatif protéique (Base « *Caprinut-PDI* », n_{exp} = 33 ; n_{trt} = 103). Comme pour les autres approches, exceptées pour les données individuelles, ce sont les relations intra-expériences qui sont prises en compte de façon prioritaire dans ce travail de manière à obtenir des lois de réponses plus génériques.

L'efficacité moyenne (EffPDI) de la transformation des PDI en protéines de lait a déjà été utilisée dans deux systèmes étrangers (Volden 2011, Van Duinkerken *et al* 2011) : ces systèmes s'appuient principalement sur le travail de Subnel *et al* (1994) qui ont été les premiers à travailler sur la prédiction de l'EffPDI à partir d'une base de données. Pour le choix du critère de prédiction de l'EffPDI, compte tenu de l'influence positive des concentrations en PDI du régime sur l'ingestion de MS (Vérité et Delaby 2000, Daniel *et al* 2016), c'est la concentration en PDI par kg de MS ($PDI_{g/kgMS}$) qui a été retenue (Daniel *et al* 2016). Le rapport PDI/UFL, qui est très fortement corrélé à la teneur en $PDI_{g/kgMS}$ pourrait également être utilisé (Vérité et Delaby 2000). Cependant, avec la nouvelle méthode de calcul de la valeur nutritive des régimes (Sauvant et Nozière 2013), le rapport PDI/UFL n'est plus un attribut d'un régime comme précédemment car il varie assez largement en fonction de critères de la ration (niveau d'ingestion…). Il est de ce fait statistiquement un moins bon prédicteur de l'EffPDI que le critère $PDI_{g/kgMS}$.

Les hypothèses et méthodes de calcul de l'efficacité moyenne des PDI. Les données d'apports alimentaires des bases *« Bovidig-PDI »* + « *MoSARCO* » et « *Caprinut-PDI* » ont été calculées à l'aide du logiciel « Systool » (http://systool.fr, Chapoutot *et al* 2014) selon les principes définis par Sauvant et Nozière (2013). Ensuite, pour explorer différentes approches calculatoires possibles, les efficacités associées aux besoins PDI (pour la production des protéines de lait, les pertes endogènes fécales, les phanères et le bilan protéique corporel) ont été calculées selon les trois méthodes suivantes :

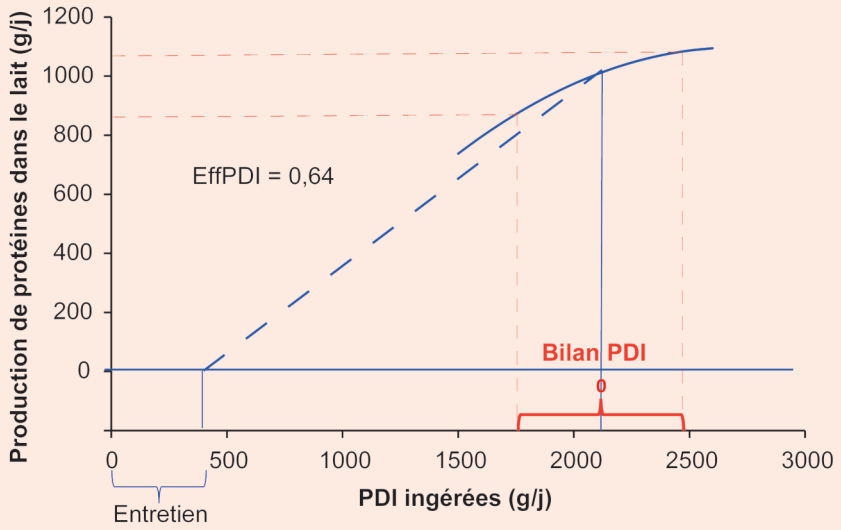
- *La méthode (1)* ou INRA 2007, qui applique les hypothèses proposées dans la version précédente (INRA 2007) du système PDI (besoin d'entretien fonction du poids métabolique, efficacité fixe de 64% des PDI disponibles en lait (Faverdin *et al* 2007). Le principe de cette approche est rappelé dans la première figure de l'encadré 1.

- *La méthode (2),* qui suppose une efficacité fixe de 67% des PDI attachée aux pertes endogènes fécales et par les phanères, et où seule l'efficacité des PDI en protéines de lait est variable en fonction du niveau d'apport. Dans cette méthode on ne tient pas compte du bilan protéique corporel, mais PDIure est pris en compte dans les calculs. C'est la méthode appliquée par les systèmes étrangers récents utilisant le concept d'efficacité.

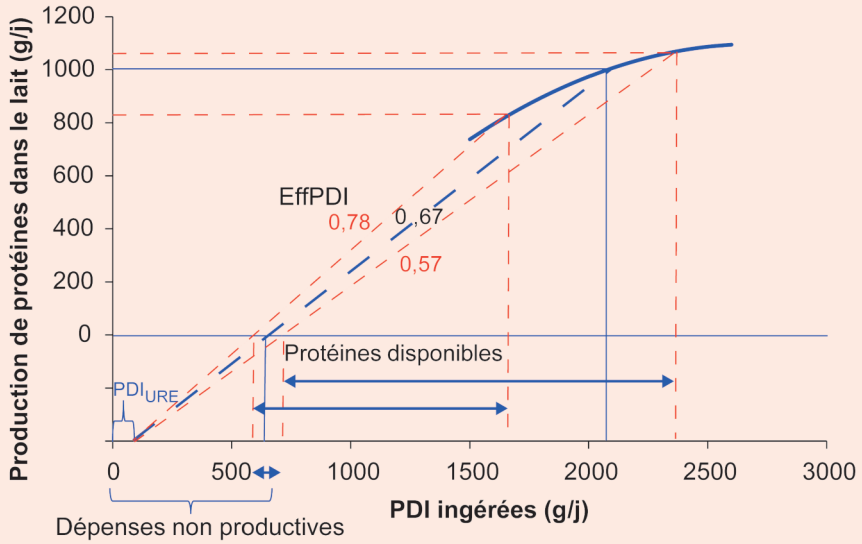
- *La méthode (3),* qui suppose aussi que l'efficacité des PDI est variable selon

Encadré 1. *Un changement de représentation des réponses aux PDI.*

Dans le système PDI appliqué avant Systali, les besoins nécessaires à l'entretien ne variaient pas avec la ration, mais seulement avec le poids de l'animal. Les besoins de production étaient calculés à partir de la quantité de protéines laitières produites en supposant un rendement constant de 0,64 pour les PDI disponibles au-dessus des besoins d'entretien. La figure ci-dessous résume ces principes. Des lois de réponses marginales de la production du lait et du taux protéique (TP) fonction la teneur en PDI/UFL du régime avaient été proposées autour de ces besoins.



Dans l'approche Systali, seul le besoin en PDI lié à la perte inévitable d'urée urinaire est lié au poids vif (PDI_{URE} dans le texte) tandis que les dépenses non productives sont en partie liées au niveau d'ingestion. Ensuite, il est proposé de prédire les réponses de production en appliquant une efficacité d'utilisation des PDI (EffPDI) qui est fonction de la ration (teneur en PDI) et de l'animal (niveaux de production et d'ingestion). Cette efficacité s'applique non seulement à la production des protéines du lait mais également aux dépenses non productives. En pratique, au-delà de ce principe d'EffPDI commune, il est aussi possible de prédire la réponse de la production des protéines de lait à partir du niveau d'apport des PDI disponibles.



leur niveau d'apport ($PDI_{g/kgMS}$), et qu'elle est égale entre les protéines du lait, les pertes endogènes fécales et des phanères. Dans cette méthode le bilan protéique corporel (BilPROT) est indexé sur le bilan énergétique correspondant (voir le calcul ci-dessous). Cette méthode suppose donc que toutes les fonctions de protéosynthèse sont affectées d'une même valeur d'efficacité d'utilisation des PDI. Les PDIure sont pris en compte dans les calculs. Cette approche originale s'effectue par un calcul itératif à partir de l'estimation par la méthode (2).

Pour appliquer ces trois approches comparatives certains paramètres doivent être mieux documentés pour améliorer la précision de l'estimation d'EffPDI. Un aspect à considérer est la quantité de protéines déposées ou mobilisées (BilPROT). Aucune valeur n'est universellement admise, sachant que, de plus, le biais de « défaut de bilan azoté » observé expérimentalement rend difficile les interprétations des bilans azotés (Spanghero et Kowalski 1997) et doit être pris en compte. Le défaut de bilan est lié à une surestimation fréquente des apports azotés et une sous-estimation systématique des pertes azotées (urine, fèces, lait) qui induisent une surestimation de la valeur du bilan N (Bilan N = BilPROT/6.25 = N ingéré – N fécal – N urinaire – N lait). Les principales références des estimations de BilPROT sont les suivantes :

- Les systèmes NorFor (Volden 2011), DVE/OEB_{2010} (Van Duinkerken *et al* 2011) et britannique FiM (Thomas 2004) proposent des valeurs qui diffèrent d'environ 20% selon que le bilan énergétique est positif ou négatif. Cependant ce principe n'est pas retenu ici car il s'appuie sur le fait que l'efficacité de conversion de l'énergie métabolisable en énergie nette du lait est supérieure à la transformation de l'énergie des réserves mobilisées en énergie nette du lait, ce qui n'est pas retenu dans l'approche Systali (Sauvant *et al* 2015).

- Pour la variation du bilan protéique (BilPROT) liée à la variation de poids vif (en g protéines/kgΔPV) pour des animaux dont l'état corporel est moyen, les propositions diffèrent au moins du simple au double. Ainsi, Chilliard *et al* (1987) ont obtenu une valeur moyenne de 86 g/kg ΔPV assez proche de la suggestion du NRC (2001) de 68 g/kg ΔPV. En revanche, le système NorFor propose 135 g/kg ΔPV, égal à la proposition du CSIRO (1990), tandis que le système FiM propose 185,5 g/kg ΔPV et le système DVE/OEB_{2010} 163,5 g/kg ΔPV. Avec la base « *Bovidig-PDI* » + « *MoSARCO* », en utilisant les données avec mesures expérimentales de la rétention azotée, la valeur correspondante est assez comparable à ces dernières références. Cependant les écart-types associés montrent qu'il s'agit d'estimations très peu précises : 187 ± 79 g/kg ΔPV en régression globale et 169 ± 70 g/kg ΔPV en régression intra expérience (n_{exp} = 24, n = 96).

- Lorsque BilPROT est exprimé par rapport à l'énergie mobilisée ou déposée, il y a également une large variabilité dans les propositions. Chilliard *et al* (1987) proposent 24,6 g protéines/$BilUFL_{1987}$ alors que le système NorFor

suggère 36,1 g/BilUFL ; pour le système DVE/OEB$_{2010}$ la valeur proposée est de 51,0 g/BilUFL, tandis que le système FiM propose 70,4 g/BilUFL. Sur 61 expériences documentées de la base « *Bovidig-PDI* » + « *MoSARCO* », la régression intra-expérience obtenue avec le Bilan UFL$_{systali}$ à 1,76 Mcal/UFL (Sauvant *et al* 2015) est :

$$\textbf{BilPROTobservé}_{g/j} = 135{,}0 + 63{,}0\ \textbf{BilUFL}_{systali}$$
($n = 251$, $n_{exp} = 61$, ETR = 131) **[11]**

Le coefficient de régression obtenu dans cette équation est intermédiaire entre ceux qui sont proposés par les systèmes DVE/OEB$_{2010}$ et FiM. En considérant qu'un défaut de bilan N proportionnel aux flux d'N mesurés dans les fèces, les urines, et le lait, surestime la rétention azotée de 53% en moyenne (Spanghero et Kowalski 1997), on aboutit à un bilan protéique corrigé de 33,0 g protéines /BilUFL$_{systali}$ pour l'équation ci-dessus. A partir de mesures individuelles, des valeurs moyennes proches, 37,5 g / BilUFL$_{2007}$ ($n = 94$, Faverdin et Vérité 1998) et 38 g/BilUFL$_{2007}$ ($n = 746$, Cutullic *et al* 2013), ont été rapportées. Par ailleurs, Faverdin *et al* (2007) ont suggéré que la mobilisation énergétique du début de lactation s'accompagne d'une mobilisation protéique de 40 g/BilUFL$_{2007}$. Ces différentes propositions sont toutes très proches. Finalement, la valeur de 33 g/BilUFL$_{systali}$ a été retenue pour Systali. Chez les chèvres laitières, on aboutit à partir de 137 traitements de 44 expériences de mesures de bilans azotés de la base « *Caprinut* » à une pente de 62 g de BilPROT observé par UFL$_{systali}$ du bilan, valeur quasi égale à celle de 63 g observé chez les vaches laitières. En conséquence, le même coefficient de 33 g/UFL$_{systali}$ du bilan est aussi appliqué au cas des chèvres laitières. Il convient cependant de garder à l'esprit que les incertitudes liées au défaut de bilan ont un poids relativement faible sur le calcul d'EffPDI. Enfin, il serait nécessaire de pouvoir étudier précisément sur un jeu de données adéquat les variations de ce ratio en fonction du stade de lactation (Tamminga *et al* 1997).

Relation générale entre l'efficacité d'utilisation des PDI et leur concentration dans la ration. Pour les vaches et les chèvres les 3 méthodes de calcul de l'EffPDI, présentées dans la partie qui précède, ont été comparées sur la base de la qualité statistique de la relation de prévision de l'efficacité des PDI (EffPDI$_{\%}$) en fonction de leur concentration dans le régime. Compte tenu de la forme curvilinéaire de la relation, le modèle exponentiel suivant a été retenu :

$$\textbf{EffPDI}_{\%} = \textbf{EffPDI100}_{\%} \times \exp[-\ \textbf{b}\ (\textbf{PDI}_{g/kgMS} - 100)]\ \textbf{[12a]}$$

EffPDI100 étant l'efficacité, en %, correspondant à une ration contenant 100 g PDI/kg MS, valeur repère simple et très proche de la moyenne des données considérées. Pour explorer les facteurs liés ou interférents, un ajustement linéaire a été utilisé dans un but de simplification (équation 12 b) :

$$\textbf{EffPDI}_{\%} = \textbf{EffPDI 100}_{\%} + \textbf{a}\ (\textbf{PDI}_{g/kg\ MS} - 100)\ \textbf{[12b]}$$

La recherche des facteurs de confusion et interférents significatifs. Au-delà de la relation générale entre EffPDI et PDI$_{g/kgMS}$, nous avons testé les principaux facteurs interférents mesurés susceptibles de la moduler. Les niveaux de production et d'ingestion ont été les facteurs les plus importants. Le rôle des acides aminés LysDi et MetDi a été également exploré dans le cas des vaches laitières pour lesquelles de nombreuses données sont disponibles.

b) Résultats obtenus chez les vaches laitières

Relation générale entre l'efficacité des PDI et leur concentration dans le régime. Les deux bases considérées, « *Bovidig-PDI* » seule ou associée au sein de « *MoSARCO* », présentent des valeurs similaires de variations d'EffPDI (67,1 ± 8,8 et 68,4 ± 7,0 %) et de PDI$_{g/kgMS}$ (90,6 ± 14,0 et 91,1 ± 11,3 g/kgMS), mais avec des nombres d'observations différents comme cela a été indiqué plus haut. Le tableau 1 indique, pour les trois méthodes de calcul évoquées ci-dessus, les paramètres de l'équation d'ajustement exponentiel des données, les valeurs des paramètres EffPDI100 et b, ainsi que les ETR de l'ajustement calculés globalement (ETR global), puis en intégrant l'effet expérience (ETR intra).

Les résultats obtenus entre les trois méthodes sont très comparables entre les deux bases de données A et B du tableau 1. Dans tous les cas, la prise en compte d'un effet expérience améliore largement la précision. L'approche 2007 (méthode (1)) aboutit à des valeurs d'EffPDI calculées nettement et systématiquement plus faibles, de l'ordre de 10 points pour EffPDI100 par rapport à la valeur de 64% supposée (cf. encadré 2), principalement en raison de la faible valeur retenue pour les dépenses d'entretien. En outre, la valeur absolue de b et l'ETR sont en moyenne les plus élevées pour les hypothèses 2007. Enfin le poids des facteurs interférents (voir ci-dessous) y est plus important que pour les deux autres méthodes (2) et (3). Les approches Systali (méthodes 2 et 3) sont plus précises, en particulier la méthode (3) qui intègre une efficacité variable des PDI mais identique pour l'ensemble des fonctions de protéosynthèse. Il s'agit là d'un principe nouveau qui sera désormais systématiquement appliqué. La figure 5A présente la relation intra expérience obtenue avec les bases « *Bovidig-PDI* » et « *MoSARCO* » regroupées (méthode (3), base B).

$$\textbf{EffPDI}_{\%} = 67{,}0 \times \exp[-\ 0{,}007\ (\textbf{PDI}_{g/kgMS} - 100)]$$
($n = 879$, $n_{exp} = 296$, ETR = 1,7) **[12c]**

Cette équation **[12c]** indique que pour PDI$_{g/kgMS}$ = 100 on a EffPDI = 67%. Compte tenu que la forme curvilinéaire de l'équation **[12c]** et de la figure 5 est peu marquée, quoique significative, il est possible, en perdant très peu de précision, de calculer une relation linéaire simple de prévision de l'efficacité des PDI) :

$$\textbf{EffPDI}_{\%} = 67{,}3 - 0{,}45\ (\textbf{PDI}_{g/kgMS} - 100)$$
($n = 878$, $R^2 = 0{,}60$, ETR = 4,5) **[12d]**

En intra-expérience, une équation nettement plus précise peut être obtenue (équivalence à l'équation **[12c]**) :

$$\textbf{EffPDI}_{\%} = 67{,}1 - 0{,}52\ (\textbf{PDI}_{g/kgMS} - 100)$$
($n = 872$, $n_{exp} = 296$, ETR = 2,0) **[12e]**

Cette équation, simplifiée, présente une bonne précision dans l'intervalle des teneurs en PDI situées approximativement entre 75 et 125 g/kg MS ce qui correspond à la très grande majorité des

Tableau 1. *Principaux paramètres des ajustements intra-expérience de l'efficacité des PDI pour le lait en fonction des trois méthodes décrites et de la base considérée, données vaches laitières (équation **[12a]**).*

Méthode	Base [1]	EffPDI100	b	ETR global	ETR intra
(1)	A	53,7	- 0,014	9,3	4,9
(1)	B	56,8	- 0,011	8,0	3,3
(2)	A	62,7	- 0,014	7,3	3,5
(2)	B	66,6	- 0,008	9,3	3,3
(3)	A	65,6	- 0,010	4,5	2,0
(3)	B	67,0	- 0,007	4,5	1,7

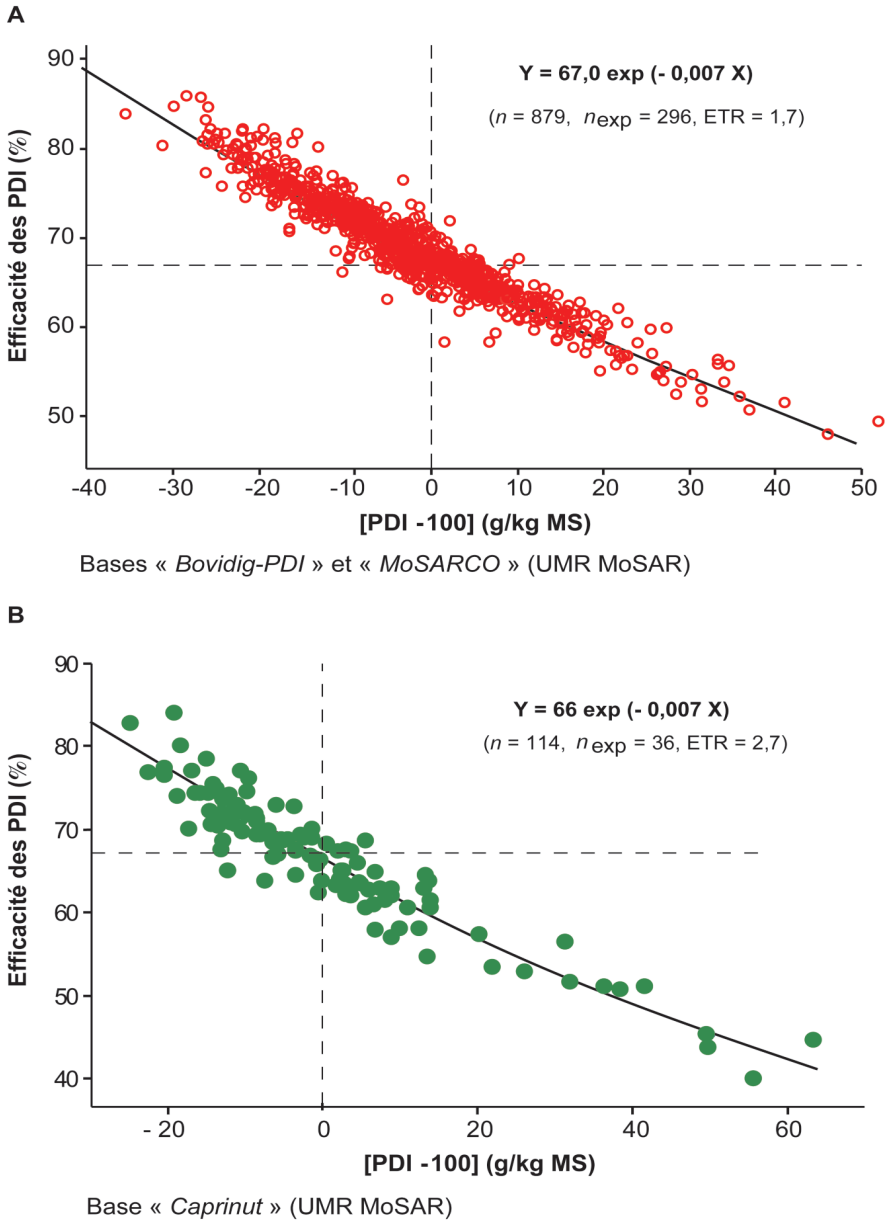
[1] : A = base « *Bovidig-PDI* » seule, B = bases « *Bovidig-PDI* » et « *MoSARCO* »

Encadré 2. *Conséquences pratiques pour la prévision de l'efficacité d'utilisation des apports en PDI et de la réponse marginale de la production de matières protéiques.*

Dans la mesure où l'on considère que le bilan PDI est nul, l'efficacité moyenne des PDI (EffPDI) est calculée de manière algébrique à partir des apports, des dépenses productives et non productives (équations **[15]** et **[16]** en fonction du bilan énergétique). Cette EffPDI est identique pour toutes les fonctions de protéosynthèse. Elle décroit avec l'apport PDI (teneur en PDI et quantités ingérées) et s'accroit avec le potentiel des animaux. La prévision la plus aboutie est basée sur les équations **[13b]** pour les vaches et **[14b]** pour les chèvres. Elle peut être modulée en situation de carence en AA limitant.

En raison de la sensibilité de ce paramètre, EffPDI n'est pas directement utilisée pour prédire la réponse marginale de MP (RepMP) aux apports PDI. La prévision de RepMP nécessite de déterminer une situation de référence, qui correspond soit au potentiel de l'animal lorsqu'il est connu, soit à une situation « pivot » (MP observée dans des situations d'alimentation non limitantes), en considérant EffPDI = 67%. La réponse aux apports PDI dépend alors des variations de PDI disponibles (par rapport à cette situation de référence) et du bilan énergétique (équation **[19]**).

Figure 5. *Influence, chez les vaches laitières (**A**) et les chèvres laitières (**B**), de la concentration en PDI du régime sur l'efficacité des PDI pour le lait et les autres processus impliquant des protéines (méthode (3), § 3.2.a).*



régimes utilisés en pratique (zone de plausibilité). Pour les deux équations **[12d]** et **[12e]** l'ordonnée à l'origine, qui correspond à $PDI_{g/kgMS}$ = 100, est d'une valeur comparable à celle de l'équation **[12c]**.

Avec une base de données comprenant 129 expériences de la littérature focalisées sur le niveau d'apport de PDI et 400 traitements (Base « *RICO* », UMR Pégase), Faverdin *et al* (non publié) ont obtenu une équation intra expérience assez comparable à la **[12e]** avec une constante un peu plus faible (63,2), mais une pente significativement plus élevée (- 0,72) et un ETR également un peu plus élevé (2,9).

La même démarche, réalisée cette fois à partir de données individuelles de vaches laitières issues d'une série d'expériences (*n* = *6* expériences – 483 données) conduites à l'UMR Pegase (Delaby et Faverdin non publié) comportant différents niveaux d'apports PDI, aboutit à une équation inter-individus et intra-expériences dont les coefficients sont très voisins.

$$\mathbf{EffPDI_{\%} = 66{,}0 - 0{,}64\ (PDI_{g/kgMS} - 100)}$$
(n = *483*, n_{exp} = 6, ETR = 4,37) **[12f]**

Cette approche, différente de toutes les précédentes car basée sur des données individuelles, conforte néanmoins le rôle prépondérant de la teneur en PDI du régime sur l'efficacité des PDI et également la pertinence des coefficients obtenus par les méta-analyses des données de la littérature.

Etude des relations entre les teneurs en PDI, LysDi et MetDi, conséquences sur l'EffPDI. Lorsqu'on fait varier l'apport PDI, d'autres caractéristiques de la ration sont aussi systématiquement modifiées, créant ainsi une possible confusion partielle entre effets. Ainsi, les teneurs en LysDi et MetDi exprimées en % des PDI, calculées avec Systool, sont globalement diminuées lorsque la teneur en PDI augmente, surtout pour la MetDi, comme l'indiquent les figures 6a et 6b. Ce phénomène avait déjà été mis en évidence par le NRC (2001) avec l'apport PDI en variable explicative. En conséquence, il est possible que la réponse suivant une loi des rendements décroissants de l'ingestion et de la production aux concentrations en PDI soit en partie liée à une baisse systématique de la teneur des PDI en acides aminés essentiels, en particulier la lysine et la méthionine. Le choix des matières premières peut présenter une influence sur ces relations (Rulquin *et al* 1993, Faverdin *et al* 2003) directement reliées à la contribution de la fraction alimentaire non-dégradée dans le rumen au flux digestif. De fait, le NRC (2001) prédit les flux duodénaux d'AA à partir de régressions utilisant le % d'AA

dans la fraction alimentaire non dégradée dans le rumen et le pourcentage de cette fraction dans le flux protéique duodénal. Ainsi, plus particulièrement, les rations contenant plus de 2,5 % MS de « *corn glutenmeal* » (CGM) présentent une plus faible teneur relative en LysDi et « tirent » la relation (figure 6B). En revanche, pour un niveau donné de $PDI_{g/kgMS}$, le CGM améliore significativement la teneur en MetDI du régime (figure 6A). Rappelons en outre que le CGM présente une influence spécifique négative sur l'ingestion par rapport aux autres sources protéiques mieux équilibrées en acides aminés (Faverdin *et al* 2003).

Etude des facteurs interférents avec les réponses aux teneurs en PDI. A partir des bases « *Bovidig-PDI* » et « *MoSARCO* » réunies, en ne travaillant qu'avec la méthode (3), il est possible de partir de la régression globale **[12d]** pour étudier les facteurs interférents quantitatifs significatifs et les associer au modèle en remplacement partiel de l'effet expérience pris en compte dans l'équation **[12e]**. La recherche de ces facteurs peut être réalisée à partir de l'analyse des résidus de la régression globale **[12d]**. Il apparaît que ceux-ci sont corrélés positivement avec différentes variables, en particulier les niveaux de production des constituants du lait (R^2global = 0,40 à 0,45) et le niveau d'ingestion, la meilleure relation est obtenue avec la production de protéines plutôt que celle du lait ce qui apparaît assez logique. Cependant, compte tenu du fait que le calcul de l'EffPDI tient compte de MP, une partie de sa relation avec la variation résiduelle de **[12d]** provient peut-être de cela.

La prise en compte du niveau de production, par exemple des MP, au sein de l'équation **[12d]**, soulève la question de l'expression à prendre en compte, sachant qu'on ne connaît pas le potentiel productif des animaux de chaque publication. La possibilité la plus simple est de considérer le niveau moyen de production observé pour les animaux d'une même expérience $MPmoy_{g/j}$, ce niveau est en effet très proche de la moyenne des potentiels des individus de l'expérience considérée (Delaby communication personnelle). Une seconde possibilité consiste à retenir, comme valeur commune des traitements de chaque expérience, le traitement ayant le niveau de production le plus élevé ($MPmax_{g/j}$), supposant ainsi qu'on est plus proche du potentiel de production maximale des protéines. Lorsqu'on fait cette démarche, une relation très étroite (R^2 = 0,96) présentant une pente de 1 associe les deux séries MPmoy et MPmax. En revanche, il y a un écart systématique entre les 2 séries : $MPmax_{g/j}$ -$MPmoy_{g/j}$, = 39,1 ± 37,4 $_{g/j}$. La variabilité intra-expérience de cette différence est très liée aux différences de niveau d'apport en PDI au sein de chaque essai. Une troisième approche, facilitatrice pour les calculs de rations, consiste à prendre, pour chaque expérience, le niveau de production de protéines correspondant à la valeur EffPDI% = 67 qui a été retenue comme référence pour le calcul des besoins, soit $MP67_{g/j}$, cette valeur est en moyenne un peu plus élevée que MPmoy avec $MP67_{g/j}$ - $MPmoy_{g/j}$ = 6,6 ± 20,6 $_{g/j}$, mais la pente de la régression n'est pas différente de 1 et R^2 = 0,99 entre les deux séries. Ces résultats montrent que le choix entre les 3 variables très corrélées et translatées MPmoy ou MPmax ou MP67 a une influence négligeable sur les autres termes des équations de prédiction. Pour la suite et pour aller au plus simple, nous avons retenu $MPmoy_{g/j}$ comme critère représentatif du potentiel de production des animaux d'une même expérience. Enfin, pour conserver une valeur de la constante des équations proche de 67%, la production de protéines a été centrée sur 1000, valeur très proche de la moyenne des observations. La prise en compte de MPmoy débouche sur l'équation :

$$\mathbf{EffPDI_{\%} = 67{,}5 - 0{,}52\ (PDI_{g/kgMS} - 100) + 0{,}014\ (MPmoy_{g/j} - 1000)}$$

(n = *873*, R^2 = 0,73, ETR = 3,6) **[13a]**

Dans cette régression globale **[13a]**, le coefficient des PDI présente l'intérêt d'être le même que dans l'équation intra expériences **[12e]**. Il apparaît donc, qu'à niveau égal de teneur en PDI, les animaux plus productifs sont plus efficaces dans la transformation des PDI en protéines, laitières notamment. Il convient de garder à l'esprit que d'autres critères tels que l'apport d'énergie sont liés à MPmoy. Notons qu'avec des données individuelles, l'équation de Subnel *et al* (1994) attribuait, au contraire de l'équation **[13a]**, un coefficient négatif à la production de lait. Les coefficients de régression de l'équation **[13a]** indiquent que, sur ce jeu de données, les amplitudes des variations de l'EffPDI% en fonction du niveau de production (14 points entre 500 et 1500 g protéines/j) sont nettement plus faibles que celles liées à la teneur en PDI du régime (35 points environ, figure 5A). Cette équation est simple et générique tout en ayant des coefficients interprétables. Cependant, d'autres variables peuvent être encore intégrées pour expliquer plus avant les variations entre expériences, mais celles-ci sont de plus en plus corrélées entre elles, ce qui rend les coefficients de régression difficilement interprétables séparément. Ainsi, lorsqu'on intègre à cette équation le niveau moyen de MSI mesurée dans chaque expérience (MSI moy, kg/j), centré sur 21, le coefficient affecté à la production de protéines laitières fait plus que doubler compte tenu de sa liaison positive assez étroite avec le niveau de MSImoy (R^2 = 0,61) :

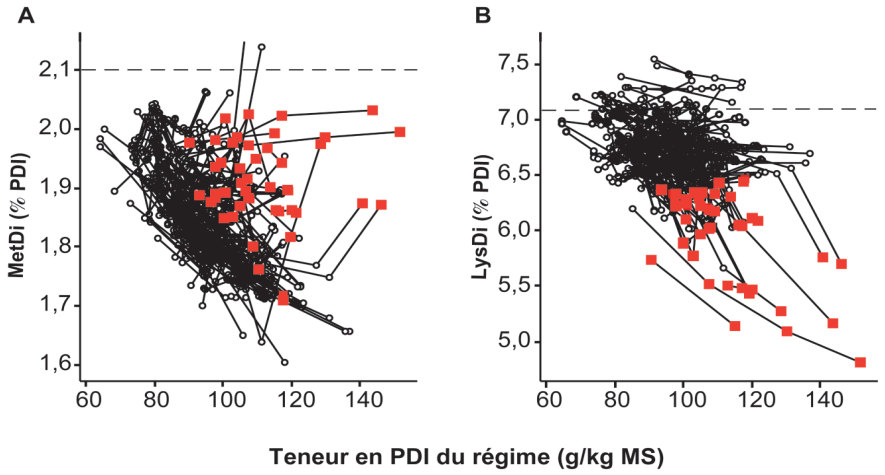
$$\mathbf{EffPDI_{\%} = 68{,}3 - 0{,}54\ (PDI_{g/kgMS} - 100) + 0{,}029\ (MPmoy_{g/j} - 1000) - 1{,}04\ (MSImoy_{kg/j} - 21)}$$

(n = *873*, R^2 = 0,83, ETR = 2,9) **[13b]**

Le signe négatif de la MSI dans l'équation [13b] est aussi la résultante de cette forte corrélation entre MPmoy et MSImoy. Son coefficient ne peut donc pas être interprété de façon isolée : il indique que, pour une concentration en PDI et un niveau de MPmoy donnés, une ingestion plus élevée va de pair avec un apport PDI accru en moyenne et, de ce fait, une moins bonne efficacité

Figure 6. *Relations entre les teneurs en PDI du régime et leurs teneurs en MetDi (**A**) et LysDi (**B**).*

Les carrés rouges correspondent aux régimes contenant plus de 2,5% de corn gluten meal.



Bases « *Bovidig-PDI* » et « *MoSARCO* » (UMR MoSAR)

d'utilisation des PDI. Le gain de variance expliquée par cette équation **[13b]** est significatif et appréciable par rapport à l'équation **[13a]**, cependant l'ETR obtenu reste nettement supérieur à celui de l'équation intra-expérience **[12e]** sans MPmoy et MSImoy. Les différentes covariables utilisées ne permettent donc d'expliquer qu'une partie de l'effet inter-expériences au-delà de l'effet lié à $PDI_{g/kgMS}$. Malgré les limites évoquées, cette équation correspond à la régression globale la plus aboutie. Notons également que les teneurs en LysDi et MetDi ne rentrent pas significativement dans cette équation **[13b]**. Ceci ne signifie pas que les AADI ne présentent pas d'influence spécifique sur EffPDI% tel que démontré par Lemosquet *et al* (2014), mais notre base de données ne permet pas de capturer cet effet.

Avec la base des 483 données individuelles évoquée plus haut pour établir l'équation [12f] (Delaby et Faverdin non publié), il est possible d'estimer le potentiel de production de chaque animal à partir de courbes types de lactation (MPpot, g/j) et de l'intégrer dans la prédiction. L'équation inter-individus obtenue correspondante à la **[13b]** est :

$$\mathbf{EffPDI_{\%} = 68{,}7 - 0{,}59\ (PDI_{g/kgMS} - 100) + 0{,}0122\ (MPpot_{g/j} - 1000) - 1{,}09\ (MSI_{kg/j} - 21)}$$

($n = 483$, $R^2 = 0{,}74$, ETR = 4,10) **[13c]**

Les coefficients de ces deux équations **[13b]** et **[13c]** issues de bases et de types de données différentes sont relativement proches ce qui renforce leur généricité. Lorsque l'équation **[13c]** est appliquée aux 873 traitements de la base « *Bovidig-PDI* » + « *MoSARCO* », en considérant MPpot = MPmoy, les valeurs prédites sont liées aux données EffPDI calculées selon la méthode (3) avec $R^2 = 0{,}63$ et ETR = 4,6 et avec une pente inférieure à 1 (0,72). Avec une approche comparable pour l'équation [13b], la pente est logiquement égale à 1, et on a $R^2 = 0{,}84$ et ETR = 2,5.

En conclusion, sur le jeu très important et diversifié des données de la base « *Bovidig-PDI* » + « *MoSARCO* » les équations basées sur des données individuelles **[13c]** fournissent des valeurs proches mais une précision de prédiction logiquement inférieure à celle établie sur l'ensemble de cette base **[13b].** L'idéal aurait été de pratiquer une validation croisée des deux équations. L'équation **[13b]** présente également, sur la base « *Bovidig-PDI* » + « *MoSARCO* », une précision meilleure que d'autres équations qui ont été proposées dans la littérature (Sauvant, non publié).

En revanche, lorsque ces équations sont appliquées à des données externes, avec des animaux produisant à des niveaux notablement éloignés de leur potentiel estimé, en raison d'une forte limitation des apports alimentaires, la distorsion consécutive entre les valeurs relatives de MSI et MP, par rapport à leur relation statistique positive étroite, entraine des variations des prédictions de l'EffPDI% qui se répercutent ensuite sur la prédiction de la production de protéines qui s'éloignent alors des valeurs observées (Delaby *et al* non publié). Cet inconvénient n'est pas lié à la précision intrinsèque de ces équations qui est bonne, mais à l'usage qui en est fait dans des situations particulières qui sortent du champ des données et des relations utilisées pour les construire.

c) Résultats obtenus pour les chèvres laitières

Avec la base « *Caprinut-PDI* », la même méthode d'approche a été appliquée sur un ensemble d'expériences pour lesquelles l'apport azoté qualitatif ou quantitatif a été le facteur expérimental. Il en ressort que la hiérarchie entre les trois méthodes de calcul est globalement comparable à celle des vaches laitières. En outre, l'équation intra-expérience obtenue avec la méthode 3 est quasi identique (figure 4B) quoique moins précise :

$$\mathbf{EffPDI_{\%} = 66{,}0 \times \exp[-0{,}007\ (PDI_{g/kgMS} - 100)]}$$

($n = 114$, $n_{exp} = 36$, ETR = 2,7) **[14a]**

La même équation peut donc s'appliquer aux deux espèces et il en est vraisemblablement de même pour la brebis, mais la démonstration n'en est pas faite. Comme pour les vaches, cette équation significativement curvilinéaire peut être simplifiée par linéarisation en perdant peu de précision. Des variables interférentes peuvent également être mises à jour et, dans ce cas encore, le potentiel de production de protéines laitières, assimilé au niveau de production moyen de protéines de l'essai, intervient aussi de façon positive et significative.

$$\mathbf{EffPDI_{\%} = 54{,}8 - 0{,}49\ (PDI_{g/kgMS} - 100) + 0{,}131\ (MPmoy_{g/j} - 80)}$$

($n = 114$, $R^2 = 0{,}80$, ETR = 4,2) **[14b]**

Dans cette équation le coefficient de régression des PDI est proche de ce qui est obtenu pour les vaches (Equation **[13a]**), mais en revanche, le coefficient de régression des protéines est plus élevé pour les chèvres. Ce résultat est logique car l'EffPDI est du même ordre de grandeur entre les deux espèces, alors qu'il y a globalement un rapport d'environ 1 à 10 pour la production. Dans ce cas également la prise en compte du niveau de MSI permet d'améliorer un peu la prévision.

d) Calcul de l'EffPDI en fonction de l'apport en PDI disponibles

Les équations précédentes présentent l'intérêt de s'appuyer sur la teneur en PDI de la ration, critère indépendant de l'animal. A partir du moment où le principe de calcul de la méthode (3) permet d'être plus précis, on peut aussi l'appliquer pour calculer algébriquement l'EffPDI en fonction de l'ingestion de PDI, si l'on suppose un bilan PDI apparent (apports-besoins) nul. Dans ce cas, lorsque le BilUFL est positif, le BilPROT est une dépense qui s'ajoute aux autres dépenses ; le calcul de l'EffPDI se fait alors par la formule :

$$\mathbf{EffPDI_{\%} = 100 \times (PEF_{g/j} + PHA_{g/j} + MP_{g/j} + BilPROT_{g/j}) / (PDIing_{g/j} - PDI_{UREg/j})}\ \mathbf{[15]}$$

En revanche, lorsque le BilUFL est négatif, la valeur absolue de BilPROT constitue un apport à l'organisme qui s'ajoute alors aux PDIing ; le calcul de l'EffPDI se fait alors par la formule :

$$\mathbf{EffPDI_{\%} = 100 \times (PEF_{g/j} + PHA_{g/j} + MP_{g/j}) / (PDIing_{g/j} + |BilPROT_{g/j}| - PDI_{UREg/j})}\ \mathbf{[16]}$$

Ces deux équations peuvent être utiles pour le calcul pratique des rations. Au sein de ces équations les cinq critères explicatifs présentent des variabilités et donc des poids différents. Par exemple, sur environ 1 300 traitements divers de la base « *Bovidig-PDI* » + « *MoSARCO* », on constate que les critères les plus variables, donc les plus influents, sont, exprimés en écart type, PDIing (452 g/j) ; largement au-dessus de MP (206 g/j), elle-même plus importante que de PEF (96 g/j) et BilPROT (83 g/j). Les deux autres termes, PDI_{URE} (16g/j) et PHA (2 g/j), sont très peu influents. En pratique, la notion de bilan PDI ne sera plus utilisée, contrairement au bilan énergétique. En effet, avec EffPDI variable calculée selon la méthode (3), les variations du bilan PDI correspondent en fait à des variations de rejets d'N urinaire. En revanche, le bilan énergétique correspond à du stockage-déstockage des réserves corporelles, lipidiques essentiellement, et son cumul présente une influence importante sur l'état corporel et certaines réponses animales.

3.3 / Prédiction de la réponse marginale de la production aux variations des apports PDI

La réponse de l'$EffPDI_{\%}$ aux variations d'apports PDI a été présentée dans la partie 3.1. Dans la mesure où les réponses de la production sont globalement homogènes entre les expériences (figure 4B), leur prédiction directe est a

priori bien moins sensible que *via* la prédiction de l'EffPDI lorsqu'il y a des déviations importantes de production des animaux par rapport à leur potentiel (cf. ci-dessus). En outre, cette approche facilite a priori la prise en compte statistique des interactions entre les apports protéiques et énergétiques. Ces interactions ont déjà été quantifiées dans trois expériences publiées (Broderick 2003, Brun-Lafleur *et al* 2010, Rius *et al* 2010). En particulier, le dispositif expérimental original du travail de Brun-Lafleur *et al* (2010) aboutit à la prédiction de réponse de MP (RepMP, g/j) suivante :

$$\mathbf{RepMP_{g/j} = 0{,}22\ \Delta PDI_{g/j} - 0{,}00025\ \Delta PDI_{g/j}^2 + 12\ \Delta UFL_{/j} - 4{,}2\ \Delta UFL_{/j}^2 + 0{,}0051\ \Delta PDI_{g/j} \times \Delta UFL_{/j}}$$

($n = 36$, $R^2 = 0{,}65$, ETR = 33) **[17]**

Dans cette équation, ΔPDI et ΔUFL représentent les écarts par jour des apports PDI et UFL, calculés sur la base 2007, par rapport aux niveaux moyens d'apports effectués au sein de 4 groupes de vaches (2 parités et 2 potentiels de production), ces deux niveaux moyens sont de 1971 g PDI/j et 18,5 UFL/j. Dans cet essai les niveaux d'ingestion ont été limités au sein des 4 groupes. Les réponses de MP suivent des effets positifs marginalement décroissants de ΔPDI et ΔUFL, de plus l'interaction positive indique que la réponse à une des deux composantes est améliorée lorsque l'autre composante est accrue. Une équation comparable a été établie sur un ensemble plus diversifié de données, les bases « *Bovidig-PDI* » et « *MoSARCO* » réunies en ne considérant que les essais où les apports intra expérimentaux de PDI et d'$UFL_{systali}$ variaient de façon significante (Daniel *et al* 2016) :

$$\mathbf{RepMP_{g/j} = 0{,}11\ \Delta PDI_{g/j} - 0{,}00012\ \Delta PDI_{g/j}^2 + 21{,}3\ \Delta UFL_{/j} + 0{,}014\ \Delta PDI_{g/j} \times \Delta UFL_{/j}}$$

($n = 901$, $n_{exp} = 306$, ETR = 37,8) **[18]**

Dans cette équation ΔPDI et ΔUFL représentent les écarts, par jour, d'apports PDI et UFL par rapports aux niveaux moyens de production et d'apports pour l'ensemble de ces données qui sont de 967,5 g MP/j, 2100 g PDI/j et 19UFL/j. Ces deux équations **[17]** et **[18]**, construites selon des approches très différentes, présentent une certaine analogie au niveau des coefficients de régression des PDI. En revanche, l'effet curvilinéaire de l'énergie n'est pas significatif dans l'équation **[18]**. Cette différence entre les équations provient peut-être du fait que l'ingestion de MS était limitée au sein des 4 groupes de vaches étudiés par Brun Lafleur *et al* (2010), que des interactions digestives n'ont pas été prises en compte (application du système 2007 pour l'équation **[17]**) et que le type d'énergie apportée à une ration riche en ensilage de maïs était lié à une seule ressource assez spécifique (maïs grain, riche en amidon lentement digestible).

De manière à gagner en précision et en généricité sur la prédiction de RepMP, il est possible de s'appuyer sur les PDI disponibles (PDIdis, calculés selon la méthode (3)) et les bilans UFL (au lieu des apports PDI et UFL). Les calculs ont été fait sur les écarts d'apport de PDIdis par rapport à la valeur pivot qui correspond à EffPDI = 67% (PDIdis67), soit ΔPDIdis = PDIdis – PDIdis67 (figure 7). Cette valeur pivot peut être définie précisément et évite de se poser la question de l'estimation d'un potentiel de production qui peut toujours être discutée. Par ailleurs, ce n'est pas l'apport UFL mais le bilan UFL intra-expérience (BilUFLi, corrigé du bilan moyen des expériences) des animaux qui a été considéré pour la composante énergétique de la réponse, de manière à pouvoir mieux intégrer les variations du statut énergétique des animaux :

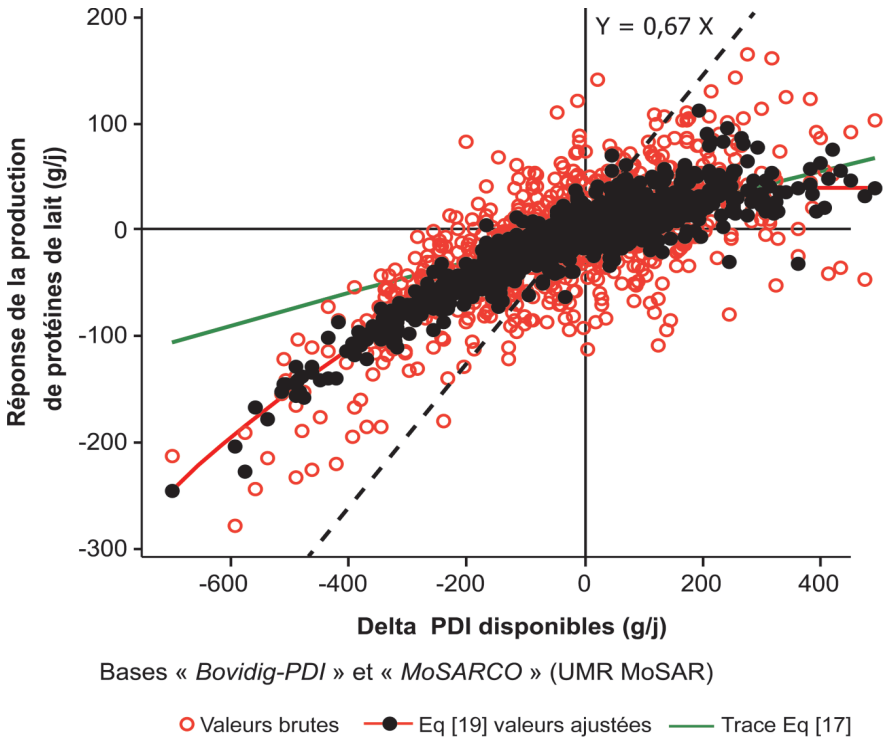
$$\mathbf{RepMP_{g/j} = 0{,}17\ \Delta PDIdis_{g/j} - 0{,}00025\ \Delta PDIdis^2_{g/j} + 16{,}6\ BilUFLi_{/j} + 0{,}010\ \Delta PDIdis_{g/j} \times BilUFLi_{/j}}$$

($n = 871$, ETR = 35,5) **[19]**

Dans cette équation l'interaction ΔPDIdis × BilUFLi est en limite de signification et son retrait ne modifie pas l'ETR. Notons que l'étude du méta-dispositif sur ΔPDIdis et BilUFLi montre que ces deux variables sont quasi indépendantes puisque le R^2 global = 0.06 et le R^2 intra = 0.20. Cela donne de la crédibilité à l'interprétation des coefficients de régression. Lorsque c'est le bilan UFL mesuré, ou bien le bilan UFL théorique (Delaby communication personnelle) des traitements qui est pris en compte, les coefficients de ΔPDIdis restent stables, l'interaction disparaît et le coefficient du BilUFL, qui regroupe alors des variations intra- et inter expériences est nettement plus faible (de l'ordre de 1,5). La figure 7 montre la relation entre RepMP et ΔPDIdis. Sur cette figure 7, l'origine des axes correspond à la situation EffPDI = 67%, les données sont en moyenne au-dessus de la droite Y = 0,67 X lorsque ΔPDIdis < 0 et au-dessous lorsque ΔPDIdis > 0 traduisant, comme cela a été évoqué plus haut, l'efficacité marginale (EffMargPDI) plus faible que l'efficacité moyenne (EffPDI). Sur ces données l'efficacité marginale des PDIdis diminue de 40% (ΔPDIdis = 600 g/j) à 17% pour ΔPDIdis = 0 et s'annule pour ΔPDIdis égal à environ 350g/j.

Lorsqu'elle est appliquée aux 871 traitements de la base « *Bovidig-PDI* » + « *MoSARCO* » pour prédire les valeurs de RepMP, à partir des variations d'apports intra-expériences de ΔPDI et ΔUFL (calcul selon Systali), l'équation **[17]** fournit des estimations (RepMPeq17) biaisées sur la pente (< 1) et la constante (< 0) : RepMP = 0,78 repMPeq17 - 9,3. La constante < 0 explique la trace de cette équation sur la figure 7. En outre,

Figure 7. *Réponse intra-expérience de la production de protéines laitières par les vaches en fonction des écarts d'apports en PDI disponibles par rapport à la situation pivot correspondant à leur efficacité de 67%.*



l'ETR est alors de 40,6 g/j alors qu'il est de 35,7 g/j lorsque l'équation [19] est appliquée sur ces mêmes données. Réciproquement, sur des données individuelles l'équation **[19]** s'est avérée plus précise que l'équation [17] ainsi que d'autres équations de prédiction de RepMP (Faverdin communication personnelle).

Dans ces approches de prédiction de la réponse des MP aux apports PDI, la question se pose de savoir si cette réponse dépend du niveau de production des animaux. Dans le travail de Brun-Lafleur *et al* (2010) la réponse était apparue plus marquée avec les animaux de potentiel plus élevé. Ce principe a été testé avec la base « *Bovidig-PDI* » + « *MoSARCO* » en multipliant par MPmoy/1000 de chaque expérience les prédictions des équations **[18]** et **[19]**. Dans ce cas, l'ajustement des données pour prédire RepMP avec les mêmes variables explicatives n'est pas statistiquement meilleur avec, respectivement, des ETR de 40,2 vs 40,6 g/j pour l'équation **[17]** et 35,5 *vs* 35,7 g/j pour l'équation **[19]**. Ce résultat suggère, à partir de cette base de données très diverses, que la réponse de MP aux PDI disponibles ne dépend pas du niveau de production. Ce résultat rejoint ceux rapportés pour les réponses aux apports d'énergie par Huhtanen et Nousiainen (2012) et Jensen *et al* (2015).

En conclusion, cette partie du travail a permis de montrer que l'hypothèse d'une valeur commune de l'efficacité des PDI pour les principales fonctions de protéosynthèse permettait d'être significativement plus précis dans l'explication et la prévision des réponses de la production de protéines laitières par les vaches et les chèvres. Elle a également permis de présenter différents modèles susceptibles d'être utilisés pour prédire pratiquement ces réponses. Trois approches majeures ont été appliquées et peuvent servir de base à du calcul de ration (encadré 2). Il s'agit d'abord de la prédiction de l'efficacité moyenne des PDI (EffPDI) à partir, comme variable explicative principale, de la teneur en PDI/MS (cf. équation **[13b]** pour les vaches et **[14b]** pour les chèvres), ou bien à partir d'un calcul direct mettant en jeu les principales variables impliquées dans la nutrition protéique, plus particulièrement le niveau d'apport PDI, les dépenses non productives et la production de protéines laitières (cf. équations **[15]** et **[16]**). La troisième approche concerne la prédiction de la réponse et de l'efficacité marginale aux niveaux d'apports de PDI disponibles (cf. équation **[19]**). Dans tous les cas nous avons cherché à discuter les avantages et inconvénients attachés aux différentes équations utilisables.

4 / La compréhension et la prévision de l'excrétion azotée urinaire

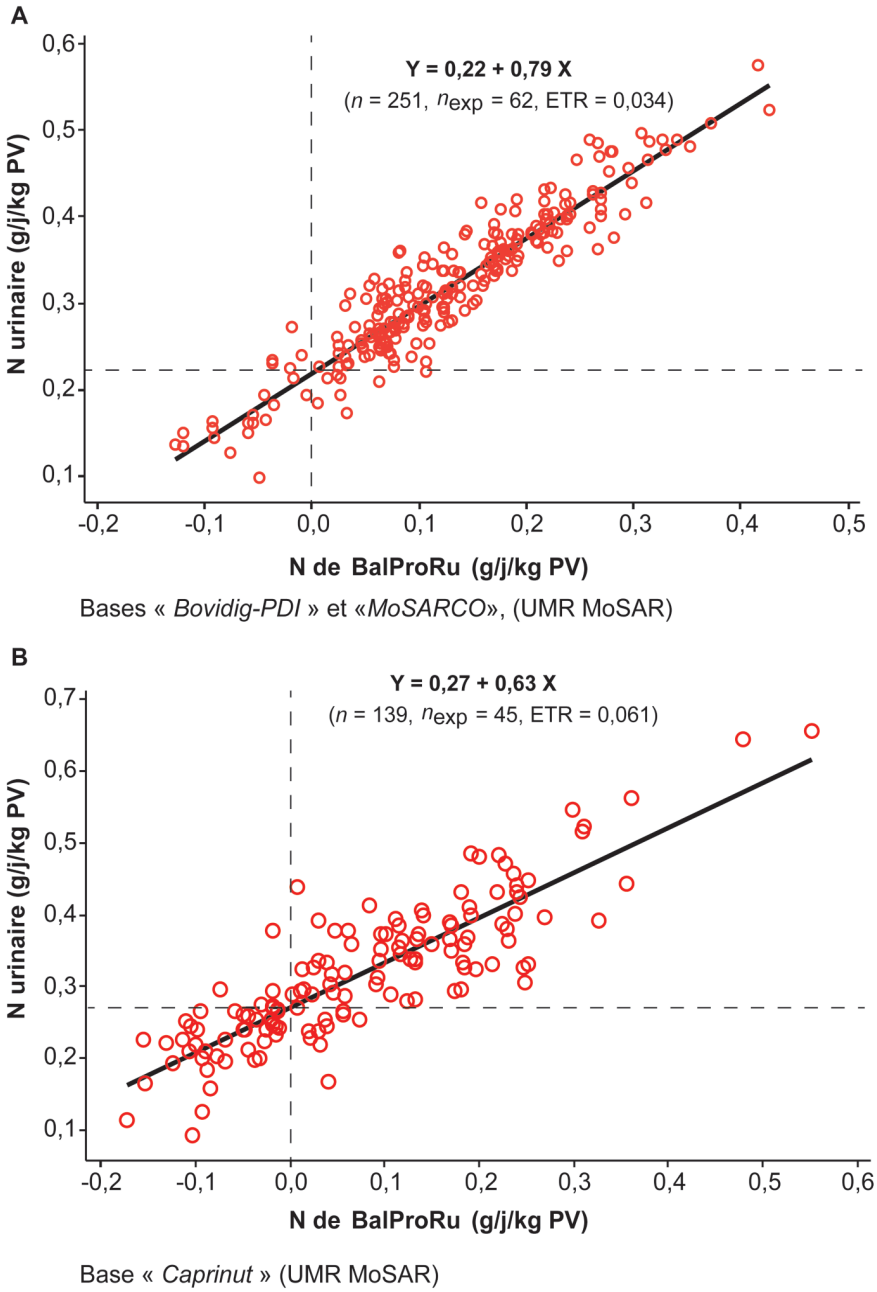
4.1 / Principes généraux

La prévision de l'excrétion azotée urinaire suscite de l'intérêt depuis plusieurs décennies. Cet intérêt a été accru avec les problèmes environnementaux rencontrés dans des zones d'élevage intensif. Jusqu'à présent cette prévision était basée sur l'application de modèles empiriques de régression (voir par exemple Waldrip *et al* 2013) ou bien sur l'usage d'un modèle mécaniste (Sauvant 1993, Kebreab *et al* 2002, Faverdin *et al* 2003). Il a semblé opportun de valider la nouvelle quantification des différents flux azotés réalisée dans le cadre des approches Systali en appliquant ces nouveaux concepts pour prédire simultanément les composantes des flux azotés urinaires.

En résumé, une approche factorielle a été appliquée pour calculer l'excrétion azotée urinaire (NUR) à partir de la somme de ses composantes prédites par les équations Systali, classées par ordre décroissant de leur contribution et exprimées par rapport au poids vif pour s'affranchir des questions de gabarit :

- Une fraction de l'N de la BalProRu mesurée (cf. § 4.2 ci-dessous).

Figure 8. *Relations intra-expérience entre l'N de la BalProRu calculée (g/kgPV) et l'excrétion azotée urinaire (g/kgPV) mesurée chez les vaches (**A**) et chez les chèvres (**B**) laitières.*



- L'N issu de l'inefficacité des PDI pour les 4 fonctions décrites plus haut, à savoir les pertes fécales endogènes, la production des protéines laitières, les pertes par les phanères et les variations de la rétention protéique corporelle. Ces calculs sont directement déduits de l'application de la méthode 3 du § 3.2.a. pour calculer l'efficacité moyenne des PDI (équations **[15]** et **[16]**), l'inefficacité étant alors 100-EffPDI$_{\%}$.

- L'N urinaire endogène selon l'équation **[7b]**

- L'N urinaire issu de l'azote microbien non aminé (équation **[7a]**).

En outre, le défaut de bilan azoté a été pris en compte en accroissant l'excrétion urinaire de l'azote non retenu au niveau corporel, soit 0,47 fois le bilan azoté mesuré (cf. § 3.2). Ce point reste critiquable car il suppose que le défaut de bilan ne provient que de l'estimation de l'N urinaire et pas de la sous-estimation des pertes fécales ou de l'azote produit dans le lait ou d'une surestimation de l'azote ingéré. Il n'a toutefois qu'un poids mineur dans la prédiction de l'NUR. L'équation appliquée est donc, avec l'ensemble de ses composantes en g N/j :

predNUR = α N_BalProRu + N_PDI (1-EffPDI) + Nue + NNPMicUR + 0,47 bilan N [20]

4.2 / Prise en compte de l'influence de BalProRu

Au sein des critères évoqués ci-dessus, le premier facteur explicatif de l'excrétion azotée urinaire (NUR) est la balance protéique du rumen (BalProRu, Sauvant et Nozière 2013). Il convient donc de commencer par évaluer la part moyenne des variations de la BalProRu qui est rejetée par la voie urinaire. Pour connaître cette part les différents critères ont été rapportés en g N par kg de poids vif.

Sur la base « *Bovidig-PDI* » + « *MoSARCO* », en sélectionnant toutes les expériences avec mesure de NUR/PV corrigé pour le défaut de bilan (cf. di-dessus), on aN_BalProRu/PV$_{g/j/kgPV}$ = 0,131 ± 0,101 et on obtient la relation intra-expérience suivante (figure 8A) :

$$\mathbf{NUR/PV_{g/j/kgPV} = 0{,}22 + 0{,}79\ N_BalProRu/PV_{g/j/kgPV}}$$
(n = *251*, n_{exp} = 62, ETR = 0,034) **[21a]**

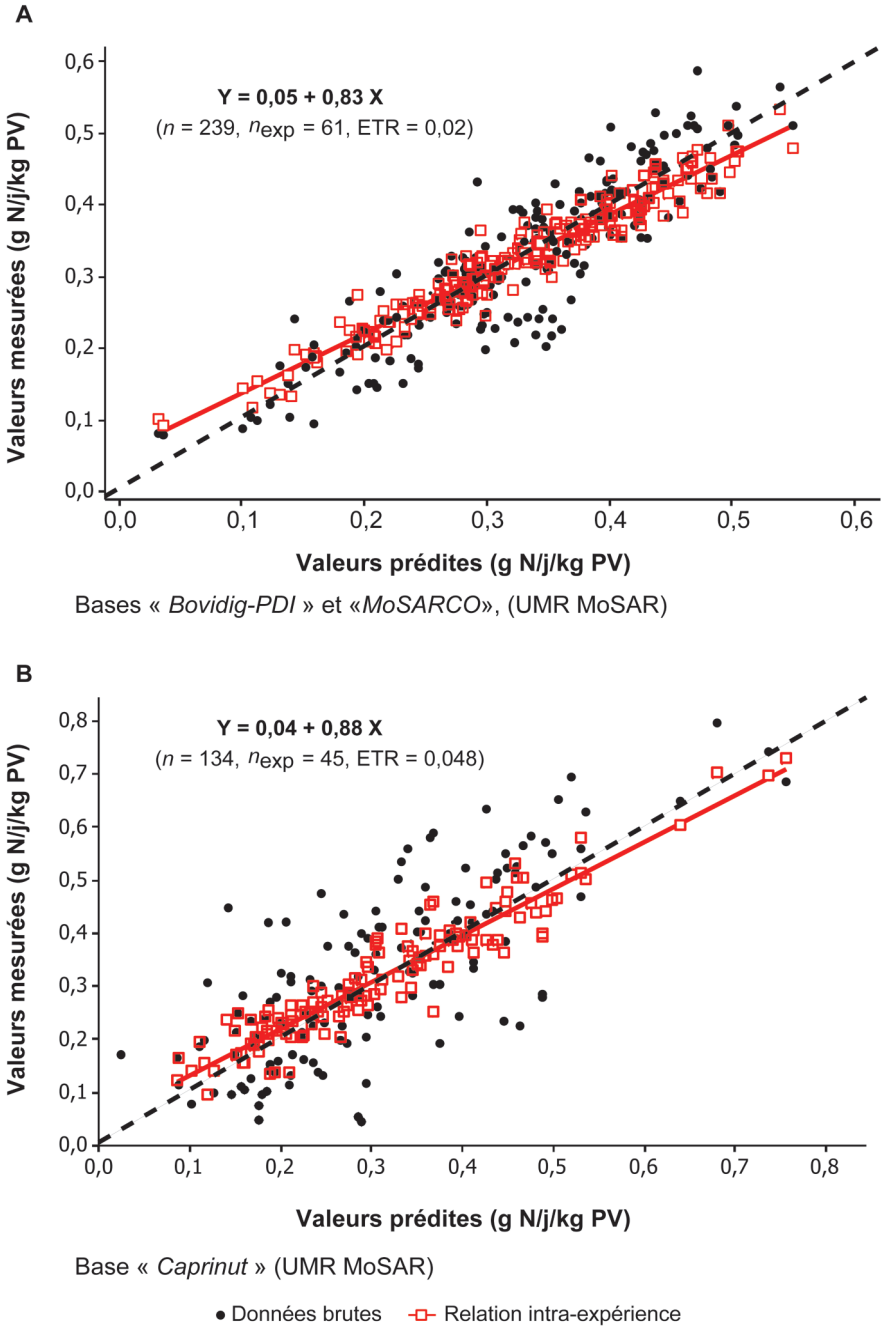
D'après cette équation **[21a]**, 79% de l'N de la BalProRu seraient rejetés par la voie urinaire chez les vaches, cette valeur est retenue pour le paramètre α de l'équation **[20]**. Lorsque le même type d'expériences est considéré sur les chèvres laitières avec la base « *Caprinut* », on a BalProRu/PV$_{g/j/kgPV}$ = 0,046 ± 0,123. La relation obtenue présente une pente un peu plus faible que la précédente et une précision d'ajustement plus faible que pour les vaches (figure 8B) :

$$\mathbf{NUR/PV_{g/j/kgPV} = 0{,}27 + 0{,}63\ N_BalProRu/PV_{g/j/kgPV}}$$
(n = *139*, n_{exp} = 45, ETR = 0,061) **[21b]**

Dans ces deux équations la constante est liée aux autres causes de pertes azotées urinaires, seule la pente est donc prise en compte dans les calculs qui suivent en appliquant un coefficient de 0,79 pour les vaches et de 0,63 pour les chèvres. Pour information, une régression très comparable aux deux précédentes a été obtenue avec la base « *Ovidig* » (UMR Herbivores) :

$$\mathbf{NUR/PV_{g/j/kgPV} = 0{,}24 + 0{,}77\ N_BalProRu/PV_{g/j/kgPV}}$$
(n = *87*, n_{exp} = 26, ETR = 0,040) **[21c]**

Figure 9. *Evaluation des prévisions globales et intra-expérience des rejets azotés urinaires chez la vache laitière (**A**) et la chèvre laitière (**B**).*



4.3 / Application du calcul aux vaches laitières

a) Evaluation

L'évaluation de ce calcul factoriel des pertes azotées urinaires a été faite sur 61 expériences correspondant à des traitements divers avec le critère NUR/PV mesuré. La relation globale entre NUR/PV mesuré (mesNUR = 0,323 ± 0,107 g N/kgPV) et prédit (predNUR, cf. 4.1 équation [20]) est la suivante, la cons-

tante non différente de 0 ayant été supprimée et la pente est égale à 1:

$$\mathbf{mesNUR/PV_{g/j/kgPV} = 1{,}00\ predNUR/PV_{g/j/kgPV}}$$
($n = 241$, $R^2 = 0{,}80$, ETR = 0,05) **[22a]**

Sur le même ensemble de données, la méthode de calcul des flux azotés proposée par Faverdin et Vérité (1998), à partir de 94 données individuelles et en calculant NUR à partir des prédictions des éléments du bilan N (N fécal, N du lait, N du bilan estimé à partir du BilUFL), aboutit aussi à une constante non différente de 0, mais à une pente d'équation de 1,74 significativement supérieure à 1, traduisant ainsi une sous-estimation systématique de plus de 60% en moyenne des variations de rejets azotés urinaires. En outre, la précision de cette équation est inférieure à celle de la **[21a]** ($R^2 = 0{,}40$, ETR = 0,08). Au niveau intra-expérience l'équation **[22a]** devient :

$$\mathbf{mesNUR / PV_{g/j/kgPV} = 0{,}05 + 0{,}83\ predNUR / PV_{g/j/kgPV}}$$
($n = 239$, $n_{exp} = 61$, ETR = 0,02) **[22b]**

Cette relation est plus précise que la **[22a]** mais la pente est inférieure à 1. La figure 9A présente les équations **[22a]** et **[22b]** ainsi que les observations associées. Lorsque les pertes azotées urinaires des vaches sont calculées à partir des valeurs de N ingéré, N fécal et N du bilan mesuré, la relation globale construite de façon comparable à l'équation **[22a]** est moins précise puisqu'elle présente une pente nettement inférieure à 1 (0,49), un R^2 plus faible (0,34) et un ETR plus important (0,09). La relation intra-expérience, correspondante à l'équation **[22b]**, présente aussi une pente nettement inférieure à 1 (0,47) et un ETR accru (0,04). La proposition de l'approche factorielle présentée au § 4.1 est donc plus précise que cette dernière approche basée sur des mesures de bilans azotés, en outre elle permet de ventiler les origines des pertes azotées urinaires.

Enfin, notons que sur l'ensemble des données disponibles la relation intra-expérience entre $NUR/PV_{g/j/kgPV}$ et la teneur en N uréique du plasma ou du lait considérées ensemble (N urée = 0,138 ± 0,044 g/L) présente une précision proche de l'équation **[22b]**:

$$\mathbf{NUR/PV_{g/j/kgPV} = 0{,}033 + 0{,}23\ Nurée_{g/L}}$$
($n = 190$, $n_{exp} = 47$, ETR = 0,025) **[22c]**

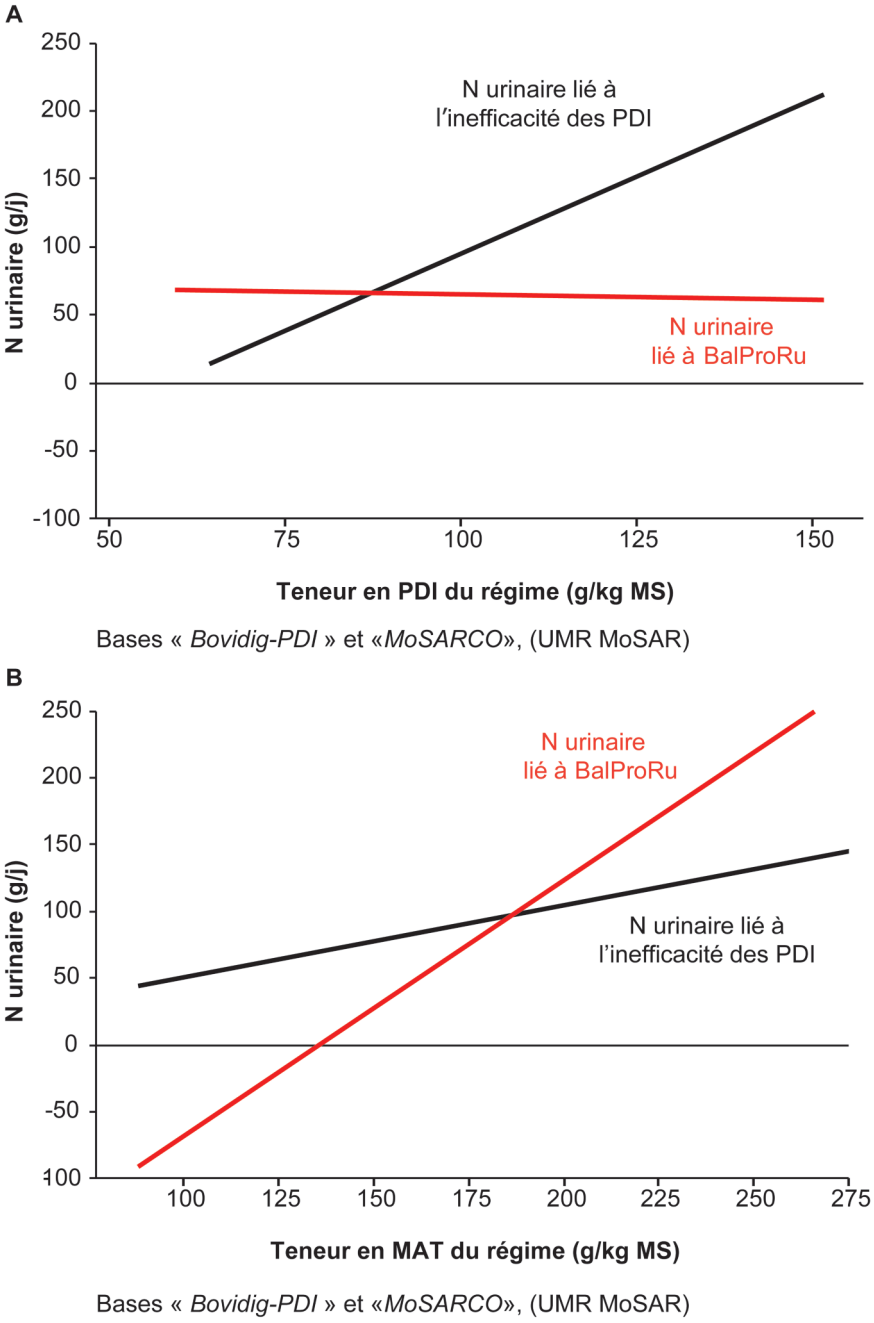
La production laitière explique une partie des variations résiduelles de cette équation, de ce fait elle entre significativement dans cette régression, comme l'avaient déjà observé Faverdin et Vérité (1998), cependant l'ETR diminue peu (ETR = 0,024).

b) Application au diagnostic de ration

A partir de toutes les données avec mesure de NUR des bases « *Bovidig –PDI* » + « *MoSARCO* », il apparaît que les deux flux explicatifs les plus importants des variations des rejets azotés urinaires sont ceux liés, d'une part, à la BalProRu et, d'autre part, à l'inefficacité métabolique des PDI. La figure 10 montre que le poids moyen de ces deux principaux postes de perte azotées urinaires dépend du facteur alimentaire pris en compte. Elle traduit des tendances moyennes globales observées à partir des bases « *Bovidig-PDI* » + « *MoSARCO* », ces relations ne sont donc que des tendances. Par exemple, les variations des concentrations en PDI influencent essentiellement les rejets liés à l'inefficacité des PDI (figure 10A) alors que les variations de la concentration en MAT (N × 6,25) influencent principalement l'N urinaire issu d'un excès d'N dégradable dans le rumen, quantifié par la réponse de la BalProRu (figure 10B). La figure 10B montre aussi le rôle d'épargne azotée permise par le recyclage d'urée pour les régimes à faible taux azoté comme indiqué par la valeur négative de la BalProRu.

En conséquence, il apparaît possible d'inclure, dans la démarche Systali, un diagnostic simple sur l'origine digestive

Figure 10. *Influences globales des variations de la teneur du régime en PDI (**A**) ou en MAT (**B**) sur les variations des deux principales composantes des rejets azotés urinaires.*



ou métabolique d'un gâchis azoté urinaire. Ainsi, comme l'illustre la figure 11, il est possible de repérer facilement les régimes induisant des pertes supérieures à un seuil donné, par exemple 75 g NUR/j, liées à l'une de ces origines majeures ou bien aux deux à la fois.

4.4 / Application aux chèvres laitières

Chez la chèvre laitière différentes équations de prévision des rejets azotés urinaires ont aussi été proposées dans les dernières années (Sauvant *et al* 2012, Giger-Reverdin et Sauvant 2014). La même approche factorielle que pour les vaches a été appliquée aux données de la base « *Caprinut* », sachant que pour les deux espèces on a observé des réponses similaires de l'efficacité des PDI en protéines laitières (figures 5A et 5B) et assez comparables des rejets d'N urinaire aux variations d'N et de la BalProRu (figures 8Aet 8B).

L'évaluation du calcul des pertes azotées urinaires a été faite sur 45 expériences correspondant à des traitements de natures diverses. La relation globale entre NUR/PV mesuré (mesNUR/PV = 0,330 ± 0,154 g N/kgPV) et prédit (predNUR) est la suivante, la constante non différente de 0 a été supprimée :

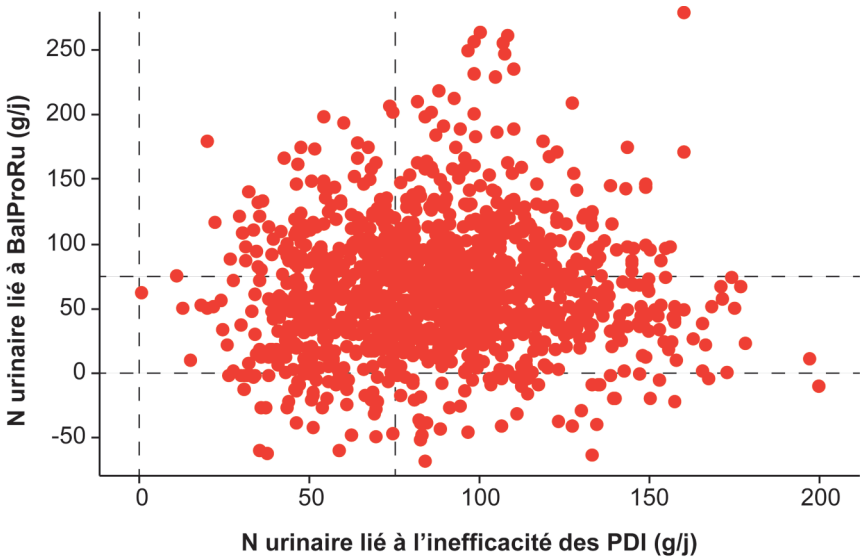
$$\mathbf{mesNUR/PV_{g/j/kgPV} = 1{,}05\ predNUR/PV_{g/j/kgPV}}$$
($n = 137$, $R^2 = 0{,}58$, ETR = 0,110) **[23a]**

La pente n'est pas significativement différente de 1, selon la valeur de R^2 et de l'ETR la précision est moins bonne que celle de l'équation comparable établie pour les vaches **[22a]**. Au niveau intra-expérience l'équation **[23a]** devient :

$$\mathbf{mesNUR/PV_{g/j/kgPV} = 0{,}04 + 0{,}88\ predNUR/PV_{g/j/kgPV}}$$
($n = 134$, $n_{exp} = 45$, ETR = 0,048) **[23b]**

Cette relation est plus précise que l'équation **[23a]**, la pente n'est pas significativement différente de 1. En revanche, cette équation est moins précise que sa correspondante établie pour les vaches laitières (équation **[22b]**). La figure 9B présente les équations **[23a]** et **[23b]** ainsi que les observations associées. Lorsque les pertes azotées urinaires des chèvres sont calculées à partir des valeurs d'N ingéré, N fécal, N lait et N du bilan mesuré, la relation globale équivalente à l'équation **[23a]** présente une pente nettement inférieure à 1 (0,66) mais des valeurs assez proches de R^2 (0,53) et d'ETR (0,113). La relation intra-expérience correspondante à l'équation **[23b]** présente aussi une pente nettement inférieure à 1 (0,64) mais un ETR comparable (0,049). Comme pour les vaches, cette dernière approche surestime les valeurs de l'excrétion azotée urinaire de la chèvre.

Figure 11. *Variations, selon les régimes, des rejets azotés urinaires d'origine digestive (BalProRu) ou métabolique (inefficacité des PDI) chez la vache laitière.*



Bases « *Bovidig-PDI* » et «*MoSARCO*», (UMR MoSAR)

Pour la prévision de NUR/PV à partir de la concentration en urée du plasma ou du lait (N urée = 0,200 ± 0,076 g/L) la relation est moins précise pour les chèvres que pour les vaches (équation **[22c]**) et présente une précision inférieure à l'équation **[23b]** :

$$\mathbf{NUR/PV_{g/j/kgPV} = 0{,}078 + 1{,}06\ Nurée_{g/L}}$$
($n = 108$, $n_{exp} = 36$, ETR = 0,065) **[23c]**

Dans ce cas encore, la production de lait rentre de façon significative dans cette équation mais le gain de précision est très faible (ETR = 0,063).

Conclusion

L'emploi d'importantes bases de données expérimentales, traitées par méta-analyses, a permis d'obtenir des relations originales robustes et précises pour quantifier, par une approche factorielle, les dépenses et les besoins protéiques non productifs des ruminants. Avec ces propositions notre nouveau système se rapproche sensiblement des propositions des autres pays. Il est apparu notamment que le calcul du besoin d'entretien protéique proportionnel au poids vif métabolique amenait à sous-estimer assez largement les pertes et besoins protéiques non productifs à mesure de l'élévation du niveau des performances et d'ingestion des vaches et des chèvres ainsi que probablement des brebis.

Ces valeurs actualisées des besoins non productifs ont permis de mieux prévoir les variations de l'efficacité des PDI disponibles pour la production des protéines du lait. Ce critère, qui est variable contrairement à ce qu'on avait considéré dans le système PDI jusqu'à présent, a été étudié pour mieux comprendre les résultats obtenus et en vue de proposer ultérieurement des méthodes de calcul des rations. Le principe d'adopter une efficacité des PDI variable en fonction du niveau d'apport, et commune à toutes les synthèses protéiques corporelles, est nouveau. En effet, jusqu'à présent les systèmes avaient, au plus, pris en compte une efficacité variable des PDI pour les protéines du lait (Volden 2011, Van Duinkerken *et al* 2011). Cette hypothèse intègre mieux la cohérence des phénomènes biologiques sous-jacents à la valorisation des PDI et apporte ainsi une meilleure précision de prédiction des réponses. Compte tenu de son influence positive sur l'ingestion de MS, la teneur en PDI de la MS ingérée est le principal facteur de variation de l'efficacité des PDI disponibles : ce critère simple a donc été retenu comme paramètre clef de la prédiction de l'efficacité des PDI. Pour prédire l'EffPDI, d'autres critères se sont avérés intéressant à prendre en compte au-delà de PDI/MS. Il s'agit notamment du niveau de production, en particulier des protéines du lait, et du niveau d'ingestion de MS. La question se pose alors de comprendre pourquoi, à niveau égal de teneur et d'apport en PDI disponibles, les animaux plus productifs apparaissent comme plus efficaces dans la transformation des PDI en protéines, laitières notamment. Il serait intéressant de mieux identifier les mécanismes sous-jacents de cet effet déjà observé sur la figure 4B : moindre turn-over protéique ? Meilleure efficacité de la mamelle ? Effet du stade de lactation… ? Lorsque les deux paramètres de production et d'ingestion sont intégrés dans la prévision, il n'est pas nécessaire de tenir compte en plus des teneurs en LysDi et MetDi des PDI qui sont négativement et assez étroitement

liés aux teneurs en PDI/MS. On ne peut donc pas exclure un rôle d'une dilution des AADI au sein des PDI pour expliquer le plafonnement de la synthèse protéique laitière lorsque la teneur en PDI/MS et le niveau d'apport de PDI disponibles augmentent. Les relations entre PDI/MS, LysDi et MetDi sont en partie dépendantes des matières premières protéiques dominantes de la base, ce constat conduit à une certaine prudence dans l'interprétation des résultats.

Les équations de prédiction de l'EffPDI appuyées sur la teneur en PDI, ainsi que les niveaux de production et d'ingestion comme variables complémentaires, dépendent en fait beaucoup de la relation étroite entre ces deux derniers critères au sein des données traitées. En conséquence, lorsque ces équations sont appliquées à des données observées présentant un écart important entre l'estimation du potentiel de production et la production réelle et la MS effectivement ingérée, les valeurs prédites d'EffPDI sont modifiées d'autant et sortent du champ des scenarii observés ce qui peut entrainer des prédictions biaisées de la production. Pour pallier à cet inconvénient il est possible de se focaliser directement sur la réponse de la production, basée sur l'efficacité marginale, plutôt que sur l'efficacité moyenne. Cette réponse a été calculée sur un vaste ensemble de données pour lesquelles la prise en compte d'une efficacité variable et commune avait préalablement été prise en compte pour le calcul des PDI disponibles. Lorsqu'on ne dispose pas d'estimation du potentiel de production des animaux, mais que l'on connaît le niveau de production des protéines laitières et l'apport en PDI disponibles, il est possible de se caler par rapport à la situation correspondante à une EffPDI égale à 67% pour prédire les réponses à des variations des PDI disponibles.

Le calcul de la fraction inefficace des PDI découle directement de l'approche précédente, il peut être combiné aux valeurs de la BalProRu du régime au sein d'une approche factorielle pour prévoir avec une bonne précision, les flux d'excrétion d'N urinaire. En outre, cette approche permet d'évaluer la part respective des origines digestives et métaboliques des rejets azotés urinaires.

Sur l'ensemble des résultats considérés, les vaches et les chèvres laitières suivent des lois de réponse très comparables aux variations des régimes alimentaires, cependant les relations sont un peu moins précises et appuyées sur moins de données pour les chèvres. Le bon degré d'analogie entre les relations des vaches et chèvres laisse supposer que leurs applications aux brebis, pour lesquelles très peu de données sont disponibles, peuvent être envisagées.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier différentes personnes qui ont aidé de différentes manières à la progression de ce travail, il s'agit, par ordre alphabétique, de : René Baumont, Laurence Buonocore, Jean Brun-Bellut, Patrick Chapoutot, Sylvie Giger-Reverdin, Hélène Lapierre, Sophie Lemosquet, Jean Louis Peyraud et Nizar Salah.

Références

AFRC, 1993. Energy and protein requirements of ruminants, 160p, CAB International, Wellingford, UK.

Broderick G.A., 2003. Effects of varying dietary protein and energy levels on the production of lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 86, 1370-1381.

Brody S., 1945. Bioenergetics and Growth; Hafner Press: New York, NY, USA.

Brun-Lafleur L., Delaby L., Husson F., Faverdin P., 2010. Predicting energy x protein interaction on milk yield and milk composition in dairy cows. J. Dairy Sci., 93, 4128-4143.

Cant J., 2005. Integration of data in feed evaluation systems. Chap 27. In « Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism". Ed CABI.

Chapoutot P., Martin O., Nozière P., Sauvant D., 2014. Systool Web, a new one-line application for the French INRA «Systali» project. EAAP 2015, Warsaw, in press.

Chen X.B., Gomes M.J., 1992. Estimation of microbial protein supply to sheep and cattle based on urinary excretion of purine derivatives – an overview of the technical details. International Feed Resources Unit, Rowett Research Institute, Bucksburn Aberdeen AB2 9SB, UK, Occasional Publication 1992, 21pp.

Chen X.B., Ørskov E.R., Hovell F.D., 1990. Excretionof purine derivatives by ruminants: Endogenous excretion, differences between cattle and sheep. Br. J. Nutr., 63,121-129.

Chilliard Y., Rémond B., Agabriel J., Robelin J., Vérité R., 1987. Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation-lactation. Bull. Tech. CRZV Theix, 70, 117-131.

Cutullic E., Faverdin P., Edouard N., Peyraud J.L., 2013. Merged Deliverables D7.2 (Report on the final validation of the shared data basis on N balance) and D7.3 (Report of simulation to quantify the effect of the main factors affecting N balance at cow level). Collaborative project FP7 RedNex, Innovative and practical management approaches to reduce nitrogen excretion by ruminants. 100pp.

Daniel J.B., Friggens N.C., Chapoutot P., Van Laar H., Sauvant D., 2016, Milk yield and milk composition responses to change in predicted net energy and metabolizable protein: A meta-analysis. Animal (accepté).

Faverdin P., Vérité R., 1998. Utilisation de la teneur en urée du lait comme indicateur de la nutrition protéique et des rejets azotés chez la vache laitière. Renc. Rech. Rum., 5, 209-215.

Faverdin P., M'hamed D., Rico-Gómez M., Vérité R., 2003. La nutrition azotée influence l'ingestion chez la vache laitière. INRA Prod. Anim., 16, 27-37

Faverdin P., Delagarde R., Delaby L.,Meschy F., 2007. Alimentation des vaches laitières. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeur des aliments - Tables INRA 2007, Editions Quae, Versailles, France, 23-58.

Fox D.G., Tedeschi L.O., Tylutki T.P., Russell J.B., Van Amburgh M.E., Chase L.E., Pell A.N., Overton T.R., 2004. The Cornell Net Carbohydrate and Protein System model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. Anim. Feed Sci. Tech., 112, 29-78.

Giger-Reverdin S., Sauvant D., 2014. Relationships of both urine nitrogen output and plasma urea concentration with rumen protein balance in lactating goats. Anim. Prod. Sci., 54, 1822-1825.

Guilloteau P., Toullec P., Grongnet J.F., Patureau-Mirand P., Prugnaud J., Sauvant D., 1986. Digestion of milk, fish and soya-bean protein in the preruminant calf: flow of digesta, apparent digestibility at the end of the ileum and amino acid composition of ileal digesta. Br. J. Nutr. 55, 571-592.

Halbouche M., Brun-Bellut J., 1995. Influence d'une réduction des apports alimentaires sur les flux digestifs et l'utilisation des matières azotées par les Caprins. Rep. Nut. Dev., 35, 105-116.

Harmeyer J., Martens H., 1980. Aspects of urea metabolism in ruminants with reference to the goat. J. Dairy Sci., 63, 1707-1728.

Huhtanen P., Nousiainen J., 2012. Production responses of lactating dairy cows fed silage-based diets to changes in nutrient supply. Livest Sci, 48, 146-158.

INRA, 1978. Principes de la nutrition et de l'alimentation des ruminants - Besoins des animaux - Valeur nutritive des aliments. INRA Publications, Versailles, France, 597p.

INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins, Besoins des animaux. Valeur des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quae, Paris, France, 311p.

Jansman A.J.M., Smink W., van Leeuwen P., Rademacher M., 2002. Evaluation through literature data of the amount and amino acid composition of basal endogenous crude protein at the terminal ileum of pigs. Anim. Feed Sci. Technol., 98, 49-60.

Jensen C., Østergaard S., Schei I., Bertilsson J., Weisbjerg M.R., 2015. A meta-analysis of milk production responses to increased net energy intake in Scandinavian dairy cows. Livest. Sci., 175, 59-69.

Journet M., Champredon C., Pion R., Vérité R., 1983. Physiological basis of the protein nutrition of high producing cows. Critical analysis of the allowances. IVth Int. Symp. Protein Metab. Nutr., Editions INRA., Paris, France 433-448.

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.

Lapierre H., Doepel L, Pacheco D., Ouellet D., 2014. Update on protein and amino-acid nutrition requirements for lactating cow. Proc.25th Ann. Florida Rum. Nutr. Symp., 166-178.

Larsen M., Madsen T.G., Weisbjerg M.R., Hvelplund T., Madsen J., 2000. Endogenous amino acid flow in the duodenum of dairy cows. Acta Agric. Scand. Sec. Anim. Sci., 50, 161-173.

Lemosquet S., Haque M.N., Faverdin P., Peyraud J.L., Delaby L., 2014. A bas comme à hauts niveaux d'apports PDI, corriger le profil en acides aminés digestibles dans l'intestin permet d'augmenter les matières protéiques du lait et l'efficience d'utilisation des PDI chez la vache laitière. Renc. Rech. Rum., 21, 139-142.

NRC, 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. Seventh Revised Edition. National Academy Press, Washington, DC, USA, 381p.

NRC, 2006. Nutrient requirements of small ruminants, National Academy Press, Washington, DC, USA, 362p.

Ørskov E.R., MacLeodN. A., KyleD. J., 1986. Flow of nitrogenfrom the rumen and abomasum in cattle and sheep given proteinfreenutrients by intragastric infusion. Br. J. Nutr., 56, 241-248.

Ouellet D.R., Demers M., Zuur G., Lobley G.E., Seoane J.R., Nolan J.V., Lapierre H., 2002. Effect of dietary fiber on endogenous nitrogen flows in lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 85, 3013-3025.

Ouellet D.R., Berthiaume R., Holtrop G., Lobley G.E., Martineau R., Lapierre H., 2010.Effect of method of conservation of timothy on endogenous nitrogen flows in lactating dairy cows. J. Dairy Sci., 93, 4252-4261.

Reynolds C.K., Kristensen N.B., 2008. Nitrogen recycling through the gut and the nitrogen economy in ruminant: An asynchronous symbiosis. J. Anim. Sci., 86, E293-305.

Rius A.G., McGilliard M.L., Umberger C.A., Hanigan M.D., 2010.Interactions of energy and predicted metabolizableproteinin determining nitrogen efficiency in the lactating dairy cow. J. Dairy Sci., 93, 2034-2043.

Rulquin H., Pisulewski P.M., Vérité R., Guinard J., 1993. Milk production and composition as a function of postruminal lysine and methionine supply: a nutrient-responseapproach. Livest. Prod. Sci., 37, 69-90.

Rulquin H., Guinard J., Vérité R., 1998. Variation of amino acid content in the small intestine digesta of cattle: development of a prediction model. Livest. Prod. Sci., 53, 1-13.

Salah N., Sauvant D., Archimède H., 2014. Nutritional requirements of sheep, goat and cattle in warm climate, a meta-analysis. Animal, 8, 1439-1447.

Sandek, A., Krawielitzki K.,Kowalczyk J., Kreienbring F., Schonhusen U., Gabel M., Zebrowska T., Hagemeister H., Voigt J., 2001. Studies on N-metabolism in different gastrointestinal secretions of sheep using the digesta exchange technique. 2. Passage of endogenous nitrogen. J. Anim. Feed Sci., 10, 605-618.

Sauvant D., 1993. Basis of a mechanistic model of exchange between ammonia and urea compartment in ruminant. Ann. Zootech., 42, 202-203.

Sauvant D., Nozière P., 2013. La quantification des principaux phénomènes digestifs chez les ruminants : les relations utilisées pour rénover les systèmes d'unités d'alimentation énergétique et protéique, INRA Prod. Anim., 26, 327-346.

Sauvant D., Giger-Reverdin S., Meschy F., Puillet L., Schmidely P., 2012. Actualisation des recommandations alimentaires pour les chèvres laitières. In : Elevage caprin. Morand-Fehr P., Sauvant D., Baumont R. (Eds). Dossier, INRA Prod. Anim., 25, 259-276.

Sauvant D., Cantalapiedra-Hijar G., Nozière P., 2014. Actualisation des besoins protéiques des ruminants et application à la détermination des réponses des femelles laitières aux apports de protéines digestibles dans l'intestin (PDI). Renc. Rech. Rum., 21, 131-134.

Sauvant D., Ortigues-Marty I., Giger-Reverdin S., Nozière P., 2015, Actualisation des besoins et efficacités énergétiques des femelles laitières. Renc. Rech. Rum., 22, in press.

Schneider B.H., 1934. The relationship of the metabolic nitrogen of the faeces to body weight and to food intake for rats. Biochem. J. 28, 360-364.

Spanghero M., Kowalski Z.M., 1997. Critical analysis of N balance experiments with lactating cows. Livest. Prod. Sci., 52, 113-122.

Subnel A.P.J., Meijer R.G.M., Van Sraalen W.M., Tamminga S., 1994. Efficiency of milk protein production in the DVE protein evaluation system. Livest. Prod. Sci., 40, 215-224.

Swanson E.W.,1977.Factors for computing requirements of protein for ruminants. J. Dairy Sci., 60, 1583-1593.

Tamminga S., Luteijn P.A., Meijer R.G.M., 1997. Changes in composition and energy content of liveweight loss in dairy cows with time after parturition. Livest. Prod. Sci., 52, 31-38.

Tas B.M., Susenbeth A., 2007. Urinary purine derivates excretion as an indicator of in vivo microbial N flow in cattle: Livest. Sci., 111, 181-192.

Terroine E., Sorg-Matter H., 1927. Loi quantitative de la dépense azotée minima des homéothermes; validité interspécifique. Arch. Physiol. Biochem., 29, 121-132.

Thomas C., 2004. Feed into milk: a new applied feeding system for Dairy cows. Nottingham University Press. 68p.

Van Duinkerken G., Blok M.C., Bannink A., Cone J.W., Dijkstra J., van Vuuren A.M., Tamminga S., 2011. Update of the Dutch protein evaluation system for ruminants: the DVE/OEB$_{2010}$ system. J. Agric. Sci., 149, 351-367.

Vérité R., Delaby L., 1998. Conduite alimentaire et rejets azoté chez la vache laitière. Interrelations avec les performances. Renc. Rech. Rum., 5, 185-192.

Vérité R., Delaby L., 2000.Relation between nutrition, performances and nitrogen excretion in dairy cows. Ann. Zootech., 49, 217-230.

Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C., 1987. Révision du système des protéines digestibles dans l'intestin. Bull. Techn. CRZV Theix, INRA, 70, 19-34.

Vérité R., Faverdin P., Agabriel J., 1997. Developments in the INRA feeding systems for dairy cows. Recents advances in animal nutrition. Wiseman J., Garnsworthy P.C. (Eds). 153-166.

Volden H., 2011. NorFor - The Nordic feed evaluation system. EAAP Publications N° 130, Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 180p.

Waldrip H.M., Todd R.W., Cole N.A., 2013. Prediction of nitrogen excretion by beef cattle: a meta-analysis. J. Anim. Sci., 91, 4290-4302.

Résumé

Dans le cadre de la révision des unités d'alimentation des ruminants (projet INRA « Systali »), les besoins protéiques ainsi que les réponses aux variations des apports protéiques ont été actualisés. Le calcul des besoins d'entretien intègre les trois principales voies de pertes obligatoires azotées, qui aboutissent aux besoins protéiques non productifs : les protéines endogènes fécales, les pertes azotées urinaires endogènes et les pertes de protéines par les phanères. Ces actualisations ont été effectuées par approche factorielle et à partir de méta-analyses de larges bases de données de la littérature. Les nouvelles valeurs de ces besoins en protéines digestibles dans l'intestin (PDI) « non productifs » ont ensuite été appliquées à de nombreuses expériences conduites sur vaches ou chèvres laitières avec pour objectif d'étudier les variations des réponses aux apports protéiques. Pour l'estimation de la réponse de l'efficacité des PDI en protéine de lait (EffPDI), il a été décidé d'appliquer une valeur commune pour les différentes productions de protéines ainsi que pour l'accrétion et la mobilisation des protéines corporelles, liées au bilan d'énergie. EffPDI est une fonction décroissante non linéaire de la concentration en PDI, identique entre les vaches et les chèvres. Il est aussi possible de prédire la réponse de la production des protéines laitières en fonction du niveau d'apport des PDI disponibles et en utilisant, comme situation pivot, soit la production pour

EffPDI = 67%, soit le potentiel de production. Les données recueillies ont également permis de calculer, de façon factorielle, les pertes azotées urinaires dont les deux principales causes sont l'inefficacité des PDI et l'état nutritionnel azoté du rumen évalué par le critère de la balance protéique du rumen (BalProRu).

Abstract

Updating protein requirements in ruminants and determination of the responses of lactating females to metabolisable protein supply

As part of the revision of ruminant feed unit systems (INRA "Systali" project) the protein requirements as well as responses to changes in protein supply were updated. The maintenance requirements take into consideration the various mandatory nitrogen losses which lead to non-productive protein requirements: metabolic fecal protein loss, urinary endogenous nitrogen loss and loss of protein from scurf. These updates have been made by factorial approaches and from meta-analyzes of large databases of literature. These new values of "non-productive" metabolisable protein supply (PDI) requirements were applied to numerous experiments performed on cows or goats with the aim to study the variation of milk responses to protein supply. For estimation of the response of the efficiency of PDI to milk protein (EffPDI in %) it was decided to apply the same EffPDI value for milk protein synthesis and for the other body proteins as well as to the accretion or mobilization of body proteins which was related to the calculated energy balance. EffPDI% is a nonlinear decreasing function of the PDI concentration, similar between cows and goats. It was also proposed to predict the response of milk protein production to the level of supply of available PDI by using, as a pivot situation, either the production for EffPDI = 67% or the potential of production. The collected data were also used to calculate, with a factorial manner, the urinary nitrogen losses. Their two major causes are the inefficiency of PDI and the ruminal nitrogen nutritional status calculated through the rumen protein balance.

SAUVANT D., CANTALAPIEDRA-HIJAR G., DELABY L., DANIEL J.-B., FAVERDIN P., NOZIÈRE P., 2015. Actualisation des besoins protéiques des ruminants et détermination des réponses des femelles laitières aux apports de protéines digestibles dans l'intestin. INRA Prod. Anim., 28, 347-368.

GLOSSAIRE

Sigle	Définition
BalProRu	Balance protéique du rumen
Bilan N	Bilan azoté mesuré (N ingéré - N lait - N urine – N fèces)
BilEN	Bilan énergétique (en énergie nette) de l'animal
BilPROT	Bilan protéique corporel
BilUFLi	Bilan UFL intra-expérience (corrigé du bilan moyen des expériences)
ΔPDI	Variation de l'apport de PDI
ΔPDIdis	Variation de l'apport de PDI disponibles
ΔUFL	Variation de l'apport d'UFL
EffPDI	Efficacité moyenne d'utilisation des PDI disponibles
EffPDI100	Efficacité d'utilisation des PDI correspondant à une ration à 100 g de PDI/kg MS
EffMargPDI	Efficacité marginale des PDI disponibles
MAMicND	Matières azotées microbiennes non digestibles
MAND	Matières azotées non digestibles
MP	Production de matière protéique dans le lait
MPobs	MP observée
MPmoy	MP moyenne (de plusieurs traitements d'une expérience)
MPpot	MP potentielle (d'un animal à un stade donné)
MOF	MO fermentescible
MOND	MO non digestible
MSI	Matière sèche ingérée
MSImoy	MSI moyenne (de plusieurs traitements d'une expérience)
N_BalProRu	N de la balance protéique du rumen (BalProRu/6,25)
NDFND	NDF non digestible
NDI	N digestible apparent ingéré
NNPMicUR	N purique (ou non protéique) urinaire issu des microorganismes du rumen
Nmic	N microbien
Nue	N urinaire endogène
NUR	N urinaire
Nurée	Teneur en N uréique du lait ou du plasma
mesNUR	N urinaire mesuré
predNUR	N urinaire prédit
PDI	Protéines digestibles dans l'intestin
PDIdisp	PDI disponibles (=PDIing-PDI_{DNP}±$PDI_{BilProt}$)
PDIing	PDI ingérés
PDI_{DNP}	Besoin PDI associé aux dépenses non productives (DNP)
PDI_{PEF}	Besoin PDI associé aux protéines endogènes fécales (PEF)
PDI_{PHA}	Besoin PDI associé aux pertes de protéines par les phanères (PHA)
PDI_{URE}	Besoin PDI associé aux pertes urinaires endogènes (URE)
PEF	Protéines endogènes fécales
PHA	Protéines des phanères
PIA	Protéines alimentaires entrant dans l'intestin
PLmoy	Production de lait moyenne (de plusieurs traitements d'une expérience)
PLpot	Production de lait potentielle (d'un animal à un stade donné)
PV	Poids vif
RepMP	Réponse de la production de matière protéique dans le lait
UFL	Unité fourragère lait