

Quantification des interactions digestives chez les petits ruminants, résultats préliminaires

NOZIERE P. (1, 2), GIGER-REVERDIN S. (3, 4), CHAPOUTOT P. (3, 4), SAUVANT D. (3, 4).

(1) INRA, UMR 1213 Herbivores, Theix, 63122, Saint Genès Champanelle

(2) VetAgroSup, UMR 1213 Herbivores, Theix, 63122, Saint Genès Champanelle

(3) INRA, UMR 791 MoSAR, 16 rue Claude Bernard, 75005, Paris

(4) AgroParisTech, UMR 791 MoSAR, 16 rue Claude Bernard, 75005, Paris

RESUME

Dans le cadre du projet «Systali» de révision des systèmes d'unités d'alimentation INRA pour les ruminants, un modèle agrégé de la digestion a été développé pour pouvoir prendre en compte les principales causes d'interactions digestives liées au niveau d'ingestion, à la proportion de concentré et à la balance protéique du rumen, influençant les processus digestifs, et leur répercussions sur les valeurs UF et PDI des régimes. Ce modèle ayant été développé à partir de mesures sur les bovins, son application directe (ou son adaptation) aux petits ruminants nécessitait d'être étudiée. L'application de ce modèle à des bases de données sur la digestion chez les ovins et les caprins indique que les variations de digestibilité de la matière organique (dMO), et de quantité de MO fermentée dans le rumen (MOF) sont bien mieux prédites avec ce nouveau modèle qu'avec le modèle INRA 2007 (sans interactions digestives). Les flux d'azote microbien et d'azote total non ammoniacal au duodénum, ainsi que leurs variations intra-expérience sont également prédits de façon satisfaisante. Une sous-estimation systématique de l'ordre de 4 à 5 points sur la dMO, qui se répercute sur la MOF est toutefois observée. Ce biais semble essentiellement expliqué par une moindre sensibilité des petits ruminants aux interactions digestives. Des coefficients correcteurs au modèle «Systali» sont recherchés pour son application aux ovins et caprins. Des résultats préliminaires sont présentés.

Quantification of digestive interactions in small ruminants, preliminary results

NOZIERE P. (1, 2), GIGER-REVERDIN S. (3, 4), CHAPOUTOT P. (3, 4), SAUVANT D. (3, 4).

(1) INRA, UMR 1213 Herbivores, Theix, 63122, Saint Genès Champanelle

SUMMARY

In order to renew the INRA feed unit systems for ruminants («Systali» project), an aggregated model of digestion was developed in order to take into account the main causes of digestive interactions related to intake level, dietary proportion of concentrate and protein balance in the rumen, that influence digestive processes and impact the UF and PDI dietary values. This model was developed from measurements on cattle, thus its direct application (or adaptation) to small ruminant diets needed to be studied. The application of this model to databases gathering measurements of digestion in sheep or goats indicates that changes in organic matter digestibility (OMD), and OM fermented in the rumen (FOM) are much better predicted than with the current INRA 2007 model (without digestive interactions). The microbial nitrogen and total non-ammonia nitrogen flow to the duodenum, and their intra-experiment variations were satisfactorily predicted. A systematic underestimation of about 4 to 5 points on OMD, which affects the FOM was, however, observed. This bias seems mainly to be explained by a lower sensitivity of small ruminants to digestive interactions. Correcting coefficients were assessed for the application of the «Systali» model to sheep and goats. Preliminary results are presented.

INTRODUCTION

La rénovation des systèmes d'unités d'alimentation des ruminants permettant une évaluation multicritère des régimes nécessite de prédire plus précisément les flux de nutriments fournis à l'animal, et donc, de pouvoir prendre en compte les interactions digestives modulant les apports énergétiques (UF) et azotés (PDI). Dans cette optique, un modèle agrégé de la digestion a été développé dans le cadre du projet «Systali» pour assurer la cohérence des différentes relations empiriques obtenues à partir de larges bases de données relatives à la digestion et aux bilans métaboliques. Ce modèle permet, en particulier, de prendre en compte les principales causes d'interactions digestives liées au niveau d'ingestion de matière sèche rapporté au poids vif (NI = MSI%PV), à la proportion de concentré (PCO) et à la balance protéique du rumen (BalProRu) sur les processus digestifs, et leurs répercussions sur les valeurs UF et PDI des régimes (Sauvant et Nozière, 2013). Comme dans les versions antérieures (INRA, 2007), ce modèle rénové des apports a été conçu pour le rationnement de l'ensemble des ruminants d'élevage (bovins, ovins, et caprins). Dans les versions

antérieures, les interactions digestives (qui correspondent pour la ration à l'écart entre la valeur observée et la valeur calculée sous hypothèse d'additivité des valeurs des aliments), n'étaient prises en compte que globalement par une correction (UFL/j) appliquée au niveau de l'énergie nette de la ration, cette correction étant variable entre espèces et types de production. Le modèle rénové permet de repositionner ces interactions digestives par rapport à ses causes donc au niveau de la digestibilité de la matière organique (dMO, en %), et de les appliquer en cohérence à la valeur UF des rations, ainsi qu'à leur valeur PDI. Toutefois, ce modèle ayant été construit essentiellement à partir de données obtenues sur des bovins, son application directe (ou son adaptation) à des régimes pour petits ruminants nécessite d'être évaluée, en particulier en ce qui concerne les interactions digestives affectant la dMO. L'objectif de cette étude était donc de confronter ce modèle à des données de digestion obtenues expérimentalement sur petits ruminants, et, le cas échéant, de proposer des corrections pour son application aux ovins et aux caprins.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. BASES DE DONNEES UTILISEES

Des bases de données expérimentales sur la digestibilité des rations par les ovins (OviDig, UMR Herbivores) et les caprins (Caprinut, UMR MoSAR) ont été constituées à partir de la bibliographie ou de données obtenues dans des unités INRA. La base OviDig comprend les résultats de 510 traitements (trt) dont 412 trt avec des mesures de dMO (140 expériences, exp), 142 trt avec des mesures de MO réellement digérée dans le rumen (MOrDR, 49 exp), et 307 trt avec des mesures de flux microbien au duodénum (95 exp). La base Caprinut comprend 437 trt avec des mesures de dMO (145 exp) et 220 trt avec des mesures de bilan azoté (70 exp). Chacun des traitements a fait l'objet d'un codage permettant de caractériser la nature du facteur expérimental mis en œuvre dans la publication.

1.2. PREDICTION DE LA DIGESTIBILITE ET DES FLUX DIGESTIFS

Pour chacun des traitements de ces bases de données, lorsque ceci était possible, les aliments ont été caractérisés par leurs valeurs alimentaires issues des tables INRA 2007. Un écart maximal de 15 g/kg de MS entre la teneur en MAT du fourrage choisi et sa teneur mesurée par les auteurs a été respecté. Les différents paramètres impliqués dans l'élaboration des valeurs UF et PDI des rations ont été calculés à partir du modèle INRA 2007 (sans interactions digestives) et à partir du modèle «Systali» (avec interactions digestives), grâce à l'outil « SysTool » (Chapoutot *et al.*, 2013) qui permet de calculer l'effet respectif des 3 facteurs d'interactions digestives (NI, PCO, BalProRu) sur la dMO :

$$dMO_{calculée} = dMO_{table} + \Delta dMO_{NI} + \Delta dMO_{PCO} + \Delta dMO_{BalProRu}$$

1.3. COMPARAISON ENTRE LES VALEURS OBSERVEES ET LES VALEURS PREDITES

Pour chacune des espèces, les écarts entre les valeurs de dMO observées d'une part, et de dMO prédites par les deux approches (INRA 2007 et «Systali») d'autre part, ont été quantifiés. Ces écarts ont été analysés en fonction des principaux facteurs expérimentaux, et en particulier les facteurs d'interactions digestives NI, PCO, et BalProRu, en s'appuyant sur les expériences focalisées sur les effets propres à chacun de ces facteurs. Ce travail a été conduit par analyse de variance-covariance (GLM) permettant de dissocier les variations intra- et inter-expérience (Sauvant *et al.*, 2005). Pour les autres paramètres d'intérêt mesurés (MOrDR, BalProRu, N microbien et N non ammoniacal au duodénum) un travail équivalent a été conduit à partir de la base OviDig (la base CapriNut ne présentant qu'un nombre très limité de mesures sur ces paramètres).

1.4. CALCUL DES COEFFICIENTS CORRECTIFS

Pour chacune des espèces, des coefficients correctifs des paramètres ΔdMO_{NI} , ΔdMO_{PCO} et $\Delta dMO_{BalProRu}$ ont été recherchés par deux approches. La première approche, globale, a consisté à chercher un coefficient correctif unique correspondant à la pente entre l'écart aux valeurs « tables » ($dMO_{observée} - dMO_{table}$) et les interactions digestives prédites par le modèle ($\Delta dMO_{SYSTALI} = \Delta dMO_{NI} + \Delta dMO_{PCO} + \Delta dMO_{BalProRu}$). La deuxième approche, plus analytique, a consisté à rechercher un coefficient correctif différentiel pour chaque critère (ΔdMO_{NI} , ΔdMO_{PCO} et $\Delta dMO_{BalProRu}$) qui permette d'annuler l'effet du facteur considéré (NI, PCO ou BalProRu) sur la différence ($dMO_{observée} - dMO_{prédite}$). Les valeurs de dMO prédites en intégrant les corrections issues de ces deux approches ont alors été comparées par GLM aux valeurs observées.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. META-DISPOSITIF DES DONNEES

Sur les 510 traitements de la base OviDig, 280 ont pu être caractérisés de façon satisfaisante à partir des tables INRA

(Tableau 1). Ces traitements correspondaient à une large variabilité de rations, en termes de NI, PCO et teneur en MAT, se traduisant par une forte variabilité de dMO observée. Pour OviDig, les interactions digestives totales appliquées par le modèle «Systali» ($\Delta dMO_{SYSTALI}$, en points de dMO) étaient de $-4,79 \pm 4,03$, avec $\Delta dMO_{NI} = -1,23 \pm 2,75$, $\Delta dMO_{PCO} = -3,61 \pm 2,39$, et $\Delta dMO_{BalProRu} = -0,07 \pm 1,52$. Pour Caprinut, les valeurs correspondantes étaient $\Delta dMO_{SYSTALI} = -5,40 \pm 3,87$, avec $\Delta dMO_{NI} = -2,83 \pm 2,86$, $\Delta dMO_{PCO} = -3,31 \pm 2,11$, et $\Delta dMO_{BalProRu} = -0,68 \pm 1,57$.

Tableau 1. Description des rations caractérisées par les tables INRA pour l'évaluation du modèle (valeurs mesurées).

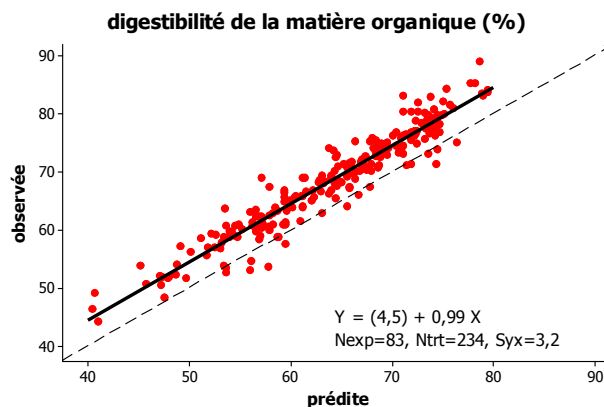
	Base OviDig	Base Caprinut
Nombre de traitements	280	421
Niveau d'ingestion de MS (% PV)	2,27±0,96	2,96±1,03
Proportion de concentré (g/g)	0,46±0,32	0,39±0,25
Matières azotées totales (%MS)	13,6±4,3	15,2±0,4
Digestibilité de la MO (%)	69,2±9,5	69,4±8,2

2.2. COMPARAISONS ENTRE LES VALEURS OBSERVEES ET LES VALEURS PREDITES

2.2.1. La digestibilité de la MO

Sur la base OviDig, l'application du modèle «Systali» (avec interactions digestives) conduit en moyenne à une sous-estimation de la dMO de l'ordre de 5 points par rapport aux valeurs observées (64,2 ± 9,5 vs 69,2 ± 9,5). Le modèle INRA 2007 (sans interactions digestives) conduit en moyenne à une très bonne prédiction (69,4 ± 9,2, Tableau 2), mais les variations de dMO intra-expérience sont mieux prédites avec le modèle «Systali» (pente = 1,00, Figure 1) qu'avec le modèle 2007 (pente = 0,80, Tableau 2).

Figure 1. Prédiction intra-expérience de la digestibilité de la matière organique chez les ovins par le modèle «Systali».



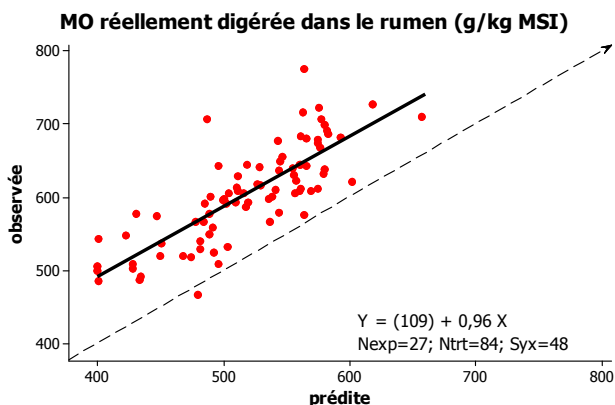
Sur la base Caprinut, des résultats très similaires sont observés :

$$dMO_{obs} = (3,9) + 1,01 dMO_{préd} \quad (N_{exp}=128, N_{trt}=381, Syx=2,9)$$

2.2.2. La MO réellement digérée dans le rumen

Sur la base OviDig, l'application du modèle «Systali» conduit à une sous-estimation moyenne de l'ordre de 87 ± 77 g / kg MS (vs 41 ± 101 avec le modèle 2007) de la MO réellement digérée dans le rumen, à partir du critère MOF (Tableau 2). Cette sous-estimation est largement expliquée par la sous-estimation de la dMO. Elle peut également s'expliquer par la relative imprécision de la mesure de MOrDR, qui est très dépendante de la méthode d'estimation du flux de MO microbienne au duodénum. Comme pour la dMO, les variations de MOrDR intra-expérience sont en revanche mieux prédites avec le modèle «Systali» (pente = 0,96, figure 2) qu'avec le modèle 2007 (pente = 0,76, Tableau 2).

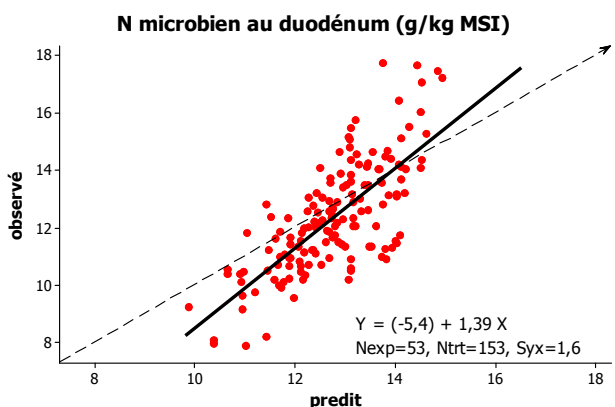
Figure 2. Prédiction intra-expérience de la MO réellement digérée dans le rumen chez les ovins par le modèle «Systali».



2.2.3. Le flux d'N microbien au duodénum

Sur la base OviDig, l'application du modèle «Systali» conduit à une estimation moyenne du flux d'N microbien équivalente à celle obtenue à partir des PDIME du modèle 2007 ($12,8 \pm 1,0$ vs $12,2 \pm 1,9$) et tout à fait satisfaisante par rapport aux valeurs observées ($12,4 \pm 3,8$, Tableau 1). Les variations intra-expérience des flux d'azote microbien sont légèrement sous-estimées, mais la pente ($1,39 \pm 0,32$) n'est pas significativement différente de 1 (Tableau 2, Figure 3).

Figure 3. Prédiction intra-expérience de l'N microbien au duodénum chez les ovins par le modèle «Systali».



Les résultats obtenus sur le flux microbien sont donc sensiblement différents de ceux obtenus sur la MORDR. Ceci résulte du fait que dans le modèle «Systali», le flux microbien n'est plus seulement proportionnel à la MOF, mais est lié à celle-ci par une fonction affine modulée par PCO et BalProRu. Ainsi, sur ces mêmes données, si le flux d'N microbien est calculé à partir des valeurs mesurées de MORDR, PCO et BalProRu, il ne diffère pas des flux mesurés :

$$N_{mic_{observé}} = -1,3 (\pm 3,6) + 1,01 (\pm 0,26) N_{mic_{calculé}}$$

(Nex = 43 ; Ntr = 123 ; etr = 1,8)

2.2.4. Le flux d'N non ammoniacal au duodénum et la balance protéique du rumen

Sur la base OviDig, l'application du modèle «Systali» conduit à une estimation moyenne du flux d'N non ammoniacal au duodénum comparable à celle obtenue avec le modèle INRA 2007 ($22,6 \pm 2,8$ vs $22,4 \pm 4,4$ g N / kg MS) et est tout à fait satisfaisante par rapport aux valeurs observées ($21,2 \pm 3,9$, Tableau 1). Toutefois, en raison de la structure analytique du système PDI, l'évaluation de la prédiction du flux d'N non ammoniacal au duodénum n'est pas aisée, car elle dépend de la prédiction de ses trois composantes (microbiennes, alimentaires et endogènes), et donc du cumul des incertitudes. Pour contourner cette difficulté, le critère

BalProRu, qui correspond à la différence entre les MAT ingérées et le flux de MA au duodénum, est plus robuste et bien adapté pour évaluer les réponses intra-expérience de ce flux d'N non ammoniacal. Ainsi, sur la base OviDig, l'application du modèle «Systali» traduit parfaitement les variations mesurées de BalProRu (Figure 4). Pour les chèvres, le résultat est comparable, mais en étant obtenu sur moins de traitements (Ntr=21).

Figure 4. Prédiction intra-expérience de la balance protéique du rumen chez les ovins par le modèle «Systali».

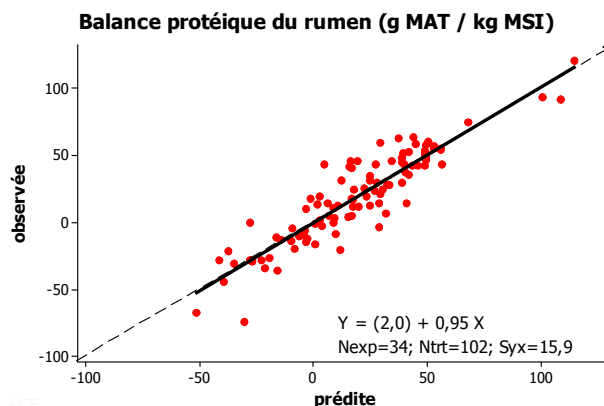
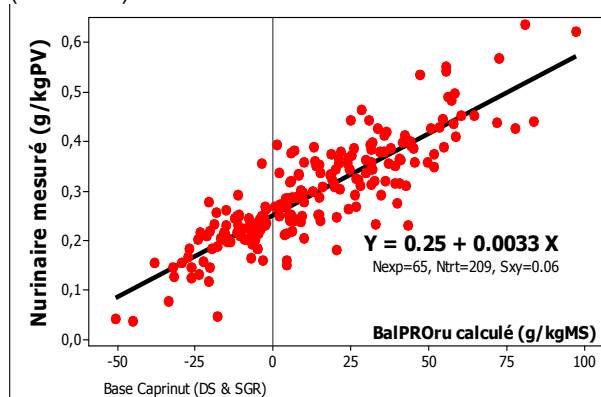


Figure 5. Influence de la balance protéique du rumen (BalProRu) sur l'excrétion azotée urinaire chez la chèvre.



Sur la base CapriNut, l'étroite relation entre BalProRu calculé et les pertes azotées urinaires observées constitue un autre aspect de validation de ce critère (Figure 5)

2.3. CALCUL DES COEFFICIENTS CORRECTIFS

Bien que les variations intra-expérience observées soient très bien prédites par le modèle «Systali» appliqué aux ovins et caprins, ce modèle conduit à une sous-estimation moyenne de la dMO et de la MORDR par rapport aux valeurs observées, ce qui suggère soit un écart systématique sur les valeurs « tables », soit que ces espèces sont moins sensibles que les bovins aux interactions digestives, et qu'une correction du modèle d'interactions digestives «Systali» est nécessaire pour son application aux petits ruminants.

2.3.1. Approche globale

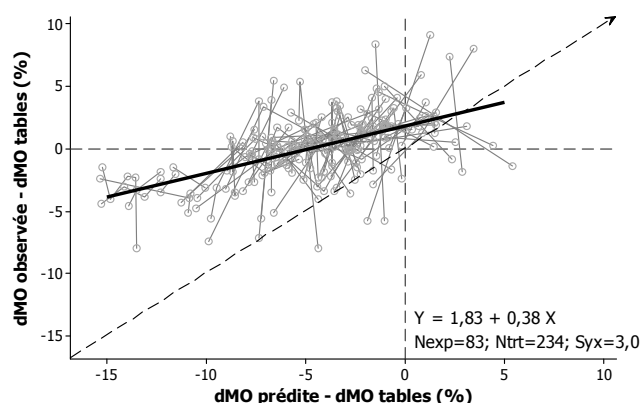
Les écarts ($dMO_{observée} - dMO_{tables}$) sont très liés aux interactions digestives totales prédites par le modèle «Systali» ($dMO_{prédite} - dMO_{tables}$), avec une pente en intra-expérience de $0,38 \pm 0,12$ sur OviDig (Figure 6), et de $0,21 \pm 0,07$ (Ntr = 389, Nex = 128) qui passe par l'origine sur CapriNut. Ceci permet d'envisager une correction globale de la dMO chez les petits ruminants du type :

$$\Delta dMO = a \Delta dMO_{SYSTALI}$$

Avec $a = 0,38$ pour les ovins, $0,21$ pour les caprins (ou un coefficient commun s'ils ne sont pas significativement différents). Cette approche simple n'est cependant pas totalement satisfaisante, car elle ne permet pas de dissocier

les effets potentiellement différents des 3 facteurs d'interactions digestives (NI, PCO, BalProRu).

Figure 6. Relation entre les écarts ($dMO_{\text{observée}} - dMO_{\text{tables}}$) et les interactions digestives prédites par le modèle « Systali » ($dMO_{\text{prédite}} - dMO_{\text{tables}}$) chez les ovins.



2.3.2. Approche analytique sur les ovins

L'approche analytique conduit à rechercher s'il est nécessaire de différencier les coefficients correctifs à appliquer pour les critères ΔdMO_{NI} , ΔdMO_{PCO} et $\Delta dMO_{\text{BalProRu}}$. Ceci nécessite un codage précis des expérimentations permettant de dissocier les effets de NI, PCO et BalProRu, qui co-varient souvent de façon non négligeable au sein du méta-dispositif. Ainsi, sur Ovidig, ces effets « purs » ne peuvent être précisément quantifiés que sur 8 exp (22 trt), 15 exp (34 trt) et 19 exp (64 trt), respectivement. Cette approche est toutefois conduite sur OviDig à titre exploratoire.

Les écarts ($dMO_{\text{observée}} - dMO_{\text{prédite}}$) ne sont pas significativement reliés à NI. Par ailleurs, l'effet de NI sur la dMO n'est pas significativement différent de celui du modèle «Systali». Ceci suggère qu'il n'est pas nécessaire de corriger l'interaction digestive liée à NI pour les ovins. Ce résultat est cohérent avec les résultats d'une méta-analyse qui indique

que l'effet du NI sur le transit ruminal est similaire entre gros et petits ruminants (Sauvant *et al.*, 2006).

En revanche, les écarts ($dMO_{\text{observée}} - dMO_{\text{prédite}}$) sont positivement liés à PCO, et cet effet s'annule lorsqu'un coefficient correctif de 0,6 est appliqué à ΔdMO_{PCO} . Ceci suggère que les interactions digestives liées à PCO sont plus faibles chez les ovins que chez les bovins. Ceci rejoint les conclusions des rares études expérimentales ayant quantifié les différences de réponse à PCO entre espèces (Colucci *et al.*, 1989 ; Dulphy *et al.*, 1990), même si ces études ne permettaient pas de séparer clairement les effets stricts de PCO d'une part, et des variations induites de NI d'autre part, sur la dMO. Par ailleurs, un effet d'interaction entre la dMO du fourrage et la réponse à PCO de la dMO de la ration (Sauvant et Giger-Reverdin, 2009) ne peut être écarté ; cette interaction non explicitement intégrée dans le modèle pourrait expliquer en partie la moindre réponse de la dMO à PCO chez les ovins.

Enfin, les écarts ($dMO_{\text{observée}} - dMO_{\text{prédite}}$) ne sont pas significativement reliés à MAT, ou à BalProRu, mais les valeurs de $\Delta dMO_{\text{BalProRu}}$ sont très faibles dans cette base de données ($-0,07 \pm 1,52$), de sorte qu'il est difficile de conclure sur cet aspect. Pour respecter le principe de construction du modèle «Systali» (compensation partielle de ΔdMO_{PCO} par $\Delta dMO_{\text{BalProRu}}$ en cas d'apport de concentré azoté), il peut être proposé d'appliquer le même coefficient correctif à $\Delta dMO_{\text{BalProRu}}$ et ΔdMO_{PCO} . Ainsi, l'approche analytique conduit à proposer la correction suivante pour les ovins :

$$\Delta dMO_{\text{OVINS}} = \Delta dMO_{\text{NI}} + 0,6 (\Delta dMO_{\text{PCO}} + \Delta dMO_{\text{BalProRu}}).$$

2.3.2. Comparaison des approches sur les ovins

Les deux approches conduisent à des résultats de dMO très comparables, qui se traduisent par une diminution du biais moyen (en particulier avec l'approche globale), mais celui-ci reste au minimum de 2,2 points (Tableau 2). Avec ces corrections, la relation entre $dMO_{\text{observée}}$ vs $dMO_{\text{prédite}}$ reste non significativement différente de la 1^{ère} bissectrice (Tableau 2).

Tableau 2. Relations intra expérience entre les données observées sur les ovins, et les données prédites par les modèles INRA 2007, «Systali», et «Systali ovins ».

Variable mesurée	Prédicteur	constante	pente	Ntrt	Nexp	etr	Observé-prédit
Digestibilité de la MO (%)	Systali	4,5 ± 4,8 ^{NS}	1,00 ± 0,08 ^{***}	234	83	3,2	5,0 ± 6,0
	INRA 2007	13,7 ± 3,6 ^{***}	0,80 ± 0,05 ^{***}	234	83	2,9	-0,12 ± 5,7
MO réellement digérée dans le rumen (g/kg MSI)	Systali	109 ± 110 ^{NS}	0,96 ± 0,21 ^{***}	84	27	48	87 ± 77
	INRA 2007	177 ± 116 ^{NS}	0,76 ± 0,21 ^{***}	86	27	50	41 ± 101
N microbien (g/kg MSI)	Systali	-5,4 ± 4,1 ^{NS}	1,39 ± 0,32 ^{***}	153	53	1,6	-0,4 ± 3,6
	INRA 2007 (avec PDIME)	0,4 ± 2,7 ^{NS}	0,98 ± 0,22 ^{***}	153	53	1,6	0,2 ± 3,9
	INRA 2007 (avec PDIM limitant)	11,5 ± 1,55 ^{***}	0,07 ± 0,14 ^{NS}	153	53	1,7	1,2 ± 3,9
Digestibilité de la MO (%)	Systali Ovins (cor. globale)	6,7 ± 4,1 ^{NS}	0,93 ± 0,06 ^{***}	234	83	2,9	2,2 ± 5,4
	Systali Ovins (cor. analytique)	6,2 ± 4,4 ^{NS}	0,95 ± 0,07 ^{***}	234	83	2,9	3,6 ± 5,6

CONCLUSION

L'application aux petits ruminants du modèle d'interactions digestives développé dans le cadre du projet «Systali», conduit à une prédiction satisfaisante des principaux flux digestifs impliqués dans l'évaluation des valeurs énergétiques et azotées des rations, et de leurs variations. Les petits ruminants semblent cependant être moins sensibles que les bovins aux interactions digestives liées à l'apport de concentrés. La structure des données disponibles, en particulier chez les caprins, rend difficile la détermination de coefficients correctifs permettant de bien différencier les effets des différents facteurs impliqués, d'autant que les variations de dMO intra-expérience sont faibles. Des coefficients correctifs à caractère préliminaire sont proposés pour pouvoir appliquer avec plus de précision le modèle «Systali» aux petits ruminants.

Chapoutot P., Nozière P., Sauvant D., 2013. 64th meeting EAAP, 138

Colucci P.E., Macleod G.K., Grovum W.L., Cahill L.W., McMillan I., 1989. J. Dairy Sci. 72:1774-1785.

Dulphy J.P., Carle B., Demarquilly C., 1990. Ann. Zootech. 39:95-111

INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins, caprins. Ed. Quae, Versailles, France

Sauvant D., Schmidely P., Daudin J.J., 2005. INRA Prod. Anim., 18, 63-73

Sauvant D., Assoumaya C., Giger-Reverdin S., Archimède H., 2006. Renc. Rech. Ruminants 13: 103

Sauvant D., Giger-Reverdin S., 2009. INRA Prod. Anim., 22, 375-384.

Sauvant D., Nozière P., 2013. Renc. Rech. Ruminants, 20, sous presse