Estimation simplifiée des interactions digestives au sein des rations des vaches laitières à partir du système d'alimentation INRA 2018

HUANG Y. (1), NOZIERE P. (2), SOUVIGNET P. (2), DELABY L. (1)
(1) INRAE, Institut Agro, UMR Pegase, 35590 Saint-Gilles, France
(2) Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champanelle, France

RESUME
Chez les vaches laitières, l'évaluation des interactions digestives (ID) associées à la composition de la ration, au niveau d'ingestion, et qui modifient les apports énergétiques, est plus mécaniste mais devient très complexe depuis 2018. Afin de disposer d'une approche simplifiée et plus directe du calcul des ID (et donc des apports énergétiques) et de la matière organique digestible ingérée (MODi) lorsque la ration est connue, nous avons simulé les apports énergétiques d'une large gamme de rations très diversifiées, conformément aux principes de rationnement proposés par l'INRA en 2018. Cette approche a permis d'établir des équations de prédiction des ID, des apports énergétiques (UFL) de la ration, et de la MODi, directement à partir des valeurs « Tables » des aliments, de la proportion de concentré (PCO, g MS/g MS) et du niveau d'ingestion (NI, kg MS / 100 kg PV). Pour obtenir les apports énergétiques de la ration, il suffit alors de soustraire de la somme pondérée des apports UFL « Tables » de chacun des aliments, un terme correctif (E, UFL/j) = - 0,765 + 1,437 × PCO – 0,126 × NI + 0,214 × NI^2. De façon similaire, pour obtenir la MODi, il faut soustraire de la somme pondérée des MOD « Tables » de chaque aliment ingéré, le terme ∆MODi = - 0,756 + 0,945 × PCO - 0,024× NI + 0,161 × NI^2. Des données expérimentales disposant de quantités ingérées individuelles mesurées (n = 1253) ont permis une évaluation externe de la pertinence de cette équation. La pente de la relation entre les valeurs prédites par cette approche simplifiée (X) et celles calculées par INRAtion®V5 (Y), proche de 1, la corrélation très élevée, et l'écart-type résiduel acceptable, valident cette approche des ID *a posteriori*. Ainsi, connaissant la composition de la ration et les quantités ingérées, il est de nouveau possible d'estimer facilement les interactions digestives et leur influence sur la valeur énergétique de la ration.

Simplified estimation of digestive interactions of diets for dairy cows based on the INRA feeding system 2018

HUANG Y. (1), NOZIERE P. (2), SOUVIGNET P. (2), DELABY L. (1)
(1) INRAE, Institut Agro, UMR Pegase, 35590 Saint-Gilles, France

SUMMARY
In dairy cows, the assessment of digestive interactions (DI) associated with diet composition, intake level, and which modify energy supply, is more mechanistic but has become very complex since 2018. In order to provide a simplified and more direct approach to calculating DI (and therefore the energy supply) and the intake of digestible organic matter (DOMi) when the ration is known, we simulated the energy supply of a wide range of highly diversified rations, in line with the rationing principles proposed in 2018. This approach has enabled us to establish prediction equations of DI, the energy supply (UFL) of the ration, and on the DOMi, directly from the "Tables" values of the feeds, the proportion of concentrate (PCO, g DM/g DM) and the feeding level (FL, kg DM / 100 kg LW). To obtain the energy intake of the ration, all that needs to be done is to subtract a corrective term from the weighted sum of the "Tables" UFL value of each feedstuff (E, UFL/d) = - 0.765 + 1.437 × PCO - 0.126 × FL + 0.214 × FL^2). Similarly, to obtain the DOMi, just subtract from the weighted sum of the "Tables" DOM of each feedstuff the ∆ DOMi = - 0.756 + 0.945 × PCO - 0.024 × FL + 0.161 × FL^2. Experimental data with measured individual intake quantities (n = 1253) enabled an external assessment of the relevance of this equation. The slope of the relationship between the values predicted by this simplified approach (X) and those calculated by INRAtion®V5 (Y), close to 1, the very high correlation, and the acceptable residual standard deviation, validate *a posteriori* this approach. Therefore, knowing the ration composition and intake quantities, it is once again possible to easily estimate digestive interactions and their influence on the ration's energy value.

INTRODUCTION

Chez les vaches laitières, les interactions digestives (ID) sont à l'origine de la non-additivité des valeurs nutritives « Tables » des aliments au sein de la ration. Depuis la révision du système d'alimentation par l'INRA en 2018, l'évaluation des ID associées à la composition de la ration, au niveau d'ingestion, et qui modifient les apports énergétiques, est plus mécaniste mais devient très complexe. Le niveau d'ingestion (NI), la proportion de concentré (PCO) dans la ration et la balance protéique du rumen (BPR) influencent à la fois la digestibilité de la matière organique et les pertes d'énergie sous forme de méthane et d'urine. De plus, le statut énergétique de l'animal a aussi un effet sur le NI, via son effet sur le taux de substitution global du concentré. L'estimation des apports énergétiques permis par une ration donnée et le calcul des bilans énergétiques issus d'expérimentations portant sur l'alimentation ne sont plus possible sans le recours au logiciel INRAtion®V5.

Ainsi, il parait pertinent de développer une approche simplifiée et plus directe du calcul des ID et de ses effets sur les apports énergétiques lorsque la composition de la ration et les quantités ingérées sont connues. Les versions précédentes du système d'alimentation INRA (Vermorel *et al.,* 1987 ; INRA 1988 ; INRA 2007) avaient proposé une équation d'estimation des effets des interactions digestives sur l'apport UFL permis par la ration des vaches laitières à partir du pourcentage d'aliments concentrés dans la ration et de la somme des apports UFL « Tables » de la ration. L'objectif de notre étude est donc de suivre le même principe pour prédire *a postériori* les interactions digestives à partir des valeurs « Tables » des aliments et des quantités ingérées.

Cet article présente la démarche appliquée dans l'élaboration d'équations simples de prédiction des effets des interactions

digestives sur les apports UFL, et sur la matière organique digestible ingérée (MODi), utilisée dans la prédiction des émissions de CH_4 entérique (INRA, 2018) chez la vache laitière. Ces méta-modèles permettront de calculer simplement les apports et les bilans UFL permis par les rations ingérées par les vaches laitières.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. BASE DE DONNEES DES RATIONS SIMULEES

Une base de données décrivant une large gamme de rations a été élaborée à partir de 4 fourrages et 4 concentrés décrits dans les Tables INRA (2018) : un ensilage de maïs (FE4720), un ensilage d'herbe (FE0490), une herbe verte (FV0620), un mélange de deux foins (50% de FF510 et 50% de FF520), l'orge (CC0010), le maïs grain (CC0020), le tourteau de soja (CX0240), et le tourteau de colza (CX0200). Au total, 136 combinaisons d'aliments ont été créées correspondant à divers types de rations, soit à base d'un seul fourrage associé à deux concentrés (un énergétique + un azoté, à optimiser par INRAtion®V5), soit à base d'un mélange de deux fourrages en différentes proportions (20%+80%, 40%+60%, 50%+50%, 60%+40%, 80%+20%) plus deux concentrés. Chaque combinaison d'aliments a été utilisée pour calculer la ration sur l'ensemble de la lactation (toutes les deux semaines de la semaine 2 à la semaine 44) de vaches primipares ou multipares de différents potentiels (production de lait potentielle au pic de 20 à 40 kg pour les primipares et de 30 à 62 kg pour les multipares). Le poids vif a été fixé au vêlage à 550 (primipares) et 650 kg (multipares), puis calculé pour chaque stade de lactation : entre 522 et 680 kg pour les primipares et entre 604 et 736 kg pour les multipares. De la même façon, la note d'état (NEC) au vêlage des primipares et des multipares a été fixée à 3,25 (primipares) et 3,00 (multipares) puis calculée pour chaque stade de lactation selon les différents potentiels laitiers : entre 2,22 et 3,25 pour les primipares et entre 1,67 et 3,00 pour les multipares.

Ainsi, 44880 rations ont été optimisées par INRAtion®V5 conformément aux principes de rationnement proposés en 2018 (INRA, 2018). Quelques rations avec une valeur de PCO trop élevée (PCO > 0,60) ont été éliminées (n=126). En effet, avec ces rations, les risques de troubles digestifs et métaboliques sont accrus et ne permettent plus de garantir la validité des équations. Au total 44754 rations diversifiées ont été retenues dans la base de données pour le développement des équations de prédiction des ID (Tableau 1).

Tableau 1 : Description de la base de données des rations simulées utilisées pour le développement des équations de prédiction (n = 44754).

	Moy	ET	Min	Max
MSI (kg/j)	21,5	4,5	11,2	34.8
NI (kg/100 kg PV)	3,52	0,74	2,07	5,77
PCO (g MS/g MS)	0,32	0,10	0,00	0,55
UFL (/ kg MS)	0,90	0,05	0,79	1,06
PDI (g/kg MS)	92	7	74	151
BPR (g/kg MS)	7	11	-4	76
MAT (g/kg MS)	150	16	123	255
Apports UFL (/jour)	19,1	3,5	10,7	28,9
Apports PDI (g/j)	1988	525	943	4964
PDI/UFL (g/UFL)	103	11	80	184

Les apports UFL « Tables » (AppUFL « Tables ») ont été calculés comme étant la somme pondérée des quantités ingérés de chaque aliment, multipliées par leur valeur UFL « Tables », sans intégrer les effets des ID. De même, la matière organique digestible ingérée (MODi) « Tables » de chaque ration a été calculée comme étant la somme pondérée des quantités ingérés de chaque aliment multipliées par leur teneur en MOD « Tables », sans intégrer les effets des ID. Enfin, les apports UFL « INRAtion » et MODi « INRAtion » intégrant les effets combinés des ID liées à NI, PCO et BPR, ont été calculés par le logiciel INRAtion ®V5.

1.2. PREDICTION DES INTERACTIONS DIGESTIVES ET DES APPORTS ENERGETIQUES DE LA RATION

Les profils des relations entre les AppUFL (ou MODi) « INRAtion » (avec les ID) et ceux issus des valeurs « Tables » (sans les ID) ont d'abord été validées graphiquement. Un terme correctif des interactions digestives (E, en UFL/j) a été calculé par différence entre AppUFL « Tables » et AppUFL « INRAtion ». L'écart de MODi (ΔMODi, en kg/j) a été calculé par la différence entre MODi « Tables » et MODi « INRAtion ». Les variables PCO, NI et BPRtable (en g/kg MS, calculée par additivité pondérée des valeurs BPR « Tables » de chacun des aliments de la ration) ont été utilisées pour développer les équations de prédiction du terme correctif E et de ΔMODi à l'aide du logiciel R (version 4.2.2). Les effets quadratiques et les interactions entre variables ont également été testés.

1.3. VALIDATION DES EQUATIONS DE PREDICTION SUR DES DONNES MESUREES

Des données expérimentales (Jurquet et Fischer, comm. personnelle) disposant de quantités ingérées individuelles mesurées (moyennes hebdomadaires, n=1253 - Tableau 2) de 60 vaches (20 primipares et 40 multipares) pendant 21 semaines ont été utilisées pour évaluer la pertinence de l'équation E obtenue.

Les termes correctifs E et ΔMODi prédits (Y) à partir des équations développées dans ce travail (cf 1.2.) ont été comparés avec les valeurs calculées par INRAtion®V5 (X) sur ce jeu de données de validation externe. Dans un 2ème temps, les AppUFL ont été calculés en retranchant aux AppUFL « Tables » le terme correctif E prédit à partir de l'équation (2), et ont été comparés aux AppUFL calculés par INRAtion®V5. De même, MODi a été calculée par différence entre MODi « Tables » et ΔMODi prédit par l'équation (4), et ont été comparés à MODi calculée par INRAtion®V5. La pente de la corrélation a été comparée à 1 et l'intercept à 0. Le carré moyen de l'erreur de prédiction (CMEP) ainsi que ses trois composants (le biais moyen, celui associé à la pente et l'aléatoire inexpliqué) ont été calculés à l'aide du logiciel Epsilon (Version 5.05/32 - 2014 - Delaby, non publié) pour évaluer la précision des valeurs prédites par l'équation par rapport aux valeurs calculées par INRAtion®V5 (Bibby et Toutenburg, 1977).

Tableau 2 : Description de la base de données utilisées pour la validation externe des équations de prédiction (n=1253).

	Moy	ET	Min	Max
MSI (kg/j)	24,4	2,8	13,4	32,7
NI (kg/100 kg PV)	3,52	0,41	2,28	4,68
PCO (g MS/g MS)	0,28	0,04	0,22	0,36
UFL (/ kg MS)	0,85	0.02	0,80	0,90
PDI (g/kg MS)	82	1	78	86
BPR (g/kg MS)	9	3	3	18
MAT (g/kg MS)	144	4	136	154
Apports UFL (/jour)	20,8	2,2	11,9	27,2
Apports PDI (g/j)	2000	243	1062	2701
PDI/UFL (g/UFL)	96	3	88	105

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. RESULTATS DES ANALYSES ET EQUATIONS DE PREDICTION

Sur le jeu de données de rations simulées, la relation entre les AppUFL « INRAtion » (Y) et « Tables » (X) ainsi que la relation équivalente avec MODi suivent la même tendance : les valeurs AppUFL et MODi calculées par INRAtion®V5 s'éloignent des valeurs « Tables » avec l'augmentation des valeurs « Tables » (Figure 1 et 2).

Les effets de PCO (P < 0,001), NI (P < 0,001) et BPRtable (P < 0,001) sur le terme correctif des interactions digestives E

sont tous significatifs. Compte tenu de la précision respective de l'ensemble des équations testées, nous avons, dans un souci de simplification et de facilité d'usage, retenu deux équations de prédiction du terme correctif des interactions digestives E :

- la 1ère intégrant les variables PCO, NI et BPRtable :

$$E\ (UFL/j) = -\ 0{,}265 + 1{,}569 \times PCO - 0{,}355 \times NI + 0{,}247 \times NI^2 - 0{,}012 \times BPRtable$$
$$(n = 44754,\ ETR = 0{,}203,\ P < 0{,}001) \quad (1)$$

- la 2ème sans la variable BPRtable:

$$E\ (UFL/j) = -\ 0{,}765 + 1{,}437 \times PCO - 0{,}126 \times NI + 0{,}214 \times NI^2$$
$$(n = 44754,\ ETR = 0{,}249,\ P < 0{,}001) \quad (2)$$

La présence de BPRtable dans le modèle permet de réduire l'écart-type résiduel associé à l'équation de 0,249 à 0,203. Selon l'équation (1), avec des valeurs moyennes de PCO (0,32 g MS/g MS), NI (3,52 kg/100 kg PV) et BPRtable (13,0 g/kg MS), le correcteur E est égal à 1,89 UFL/j. Une augmentation de PCO, NI ou BPRtable de 10% entraine une variation de E de +0.05 UFL/j (soit +2,7%), +0.52 UFL/j (soit +27,4%) ou -0,02 (soit -0.8%) respectivement. L'influence du NI sur le correcteur E est donc de loin la plus importante parmi les trois variables, et celle de la BPRtable est la plus faible. Puisque toutes les rations sont optimisées et équilibrées, les valeurs BPR des rations sont quasiment toutes supérieures à 0, (comprises entre -4 et +76, et en moyenne de 7±11 g/kg MS - Tableau 1). Ainsi, pour une application à des rations non carencées en N dégradable, nous proposons de privilégier l'équation (2) qui ne prend pas en compte la BPRtable.

Les équations de prédiction de ∆MODi retenues sont :

- la 1ère intégrant les variables PCO, NI et BPRtable :

$$\Delta MODi\ (kg/j) = -\ 0{,}525 + 1{,}006 \times PCO - 0{,}129 \times NI + 0{,}176 \times NI^2 - 0{,}006 \times BPRtable$$
$$(n = 44754,\ ETR = 0{,}150,\ P < 0{,}001) \quad (3)$$

- la 2ème sans la variable BPRtable:

$$\Delta MODi\ (kg/j) = -\ 0{,}756 + 0{,}945 \times PCO - 0{,}024 \times NI + 0{,}161 \times NI^2$$
$$(n = 44754,\ ETR = 0{,}164,\ P < 0{,}001) \quad (4)$$

Les effets de PCO ($P < 0{,}001$), NI ($P < 0{,}001$) et BPRtable ($P < 0{,}001$) sur ∆MODi sont tous significatifs. De façon similaire à l'équation E, la prise en compte de la BPRtable dans le modèle a permis de réduire légèrement l'écart-type résiduel de 0,164 à 0,150. L'augmentation de PCO, NI ou BPRtable de 10%, entraine une variation de ∆MODi de +0,03 kg/j (soit +2,2%), +0,41 kg/j (soit +28,5%) ou -0,01 kg/j (soit -0,5%) respectivement. Comme dans le cas des AppUFL, l'influence de la BPRtable reste modeste, tandis que l'effet de NI est très influent. Nous proposons de privilégier l'équation (4) qui permet d'éviter le calcul de la valeur BPRtable.

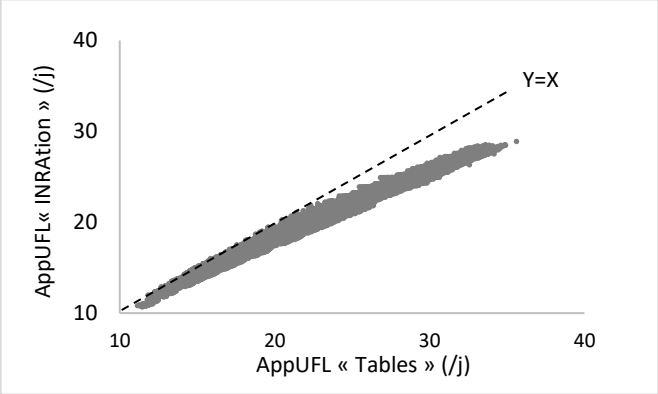

Figure 1 : Relation entre l'AppUFL « INRAtion » et « Tables » (jeu de données simulées).

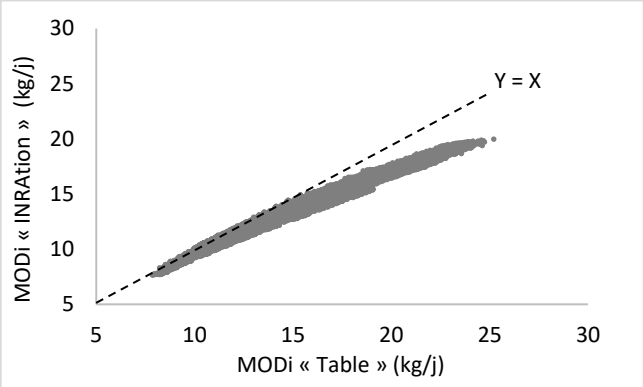

Figure 2 : Relation entre la MODi « INRAtion » et « Tables » (jeu de données simulées).

2.2. VALIDATION DES EQUATIONS DE PREDICTION

Selon le jeu de données de validation externe, le terme correctif E calculé par INRAtion®V5 et celui calculé par l'équation (2) sont correctement corrélé ($R^2 = 0{,}882$, $P < 0{,}001$), avec une pente de 0,96 (mais significativement différente de 1, $P < 0{,}001$) et un ETR de 0,197 et un CMEP de 0,064 (Figure 3). L'intercept (0,07) est significativement différent de 0 ($P < 0{,}001$). Le biais moyen et de la pente représentent respectivement 38,7%, 0,9% du CMEP. Une proportion assez élevée de CMEP (> 60%) est attribuée à la variation aléatoire, non contrôlée. Les AppUFL prenant en compte les interactions digestives calculées à partir de l'équation (2) sont très corrélés ($R^2 = 0{,}995$, $P < 0{,}001$) à ceux calculés par INRAtion®V5, avec une pente de 1,05 (significativement différente de 1, $P < 0{,}001$), un ETR de 0,165 et un CMEP de 0,063 (Figure 4). L'intercept (0,92) est significativement différent de 0 ($P < 0{,}001$). Le biais moyen, de la pente et de la variation aléatoire représentent respectivement 36,2%, 20,4% et 43,4% du CMEP. Avec une pente proche de 1, une corrélation très élevée, et un écart-type résiduel acceptable, ces analyses valident notre approche de calcul des AppUFL des rations à partir des valeurs « Tables » corrigées *a posteriori* par le terme correctif E.

Le ∆MODi calculé par l'équation (4) et celui calculé par INRAtion®V5 sont corrélés ($R^2 = 0{,}884$, $P < 0{,}001$) avec une pente de 0,96 (significativement différente de 1, $P < 0{,}001$), un ETR de 0,157 et un CMEP de 0,082 (Figure 5). L'intercept (0,16) est significativement différent de 0 ($P < 0{,}001$). Le biais moyen, de la pente et de la variation aléatoire représentent respectivement 67,8%, 0,5% et 31,7% du CMEP. Enfin, la MODi calculé à partir des valeurs « Tables » corrigées de ∆MODi estimé par l'équation (4) a permis également d'obtenir une bonne corrélation ($R^2 = 0{,}994$, $P < 0{,}001$) avec la valeur calculée par INRAtion®V5 avec une pente de 1,06 (significativement différente de 1, $P < 0{,}001$), un ETR de 0,130 et un CMEP de 0,082 (Figure 6). L'intercept (0,68) est significativement différent de 0 ($P < 0{,}001$). Le biais moyen, de la pente et de la variation aléatoire représentent

respectivement 69,1%, 11,6% et 19,3% du CMEP. Ces résultats nous permettent également de valider notre approche de calcul de la MODi des rations à partir des valeurs « Tables » corrigées *a posteriori* par le ∆MODi.

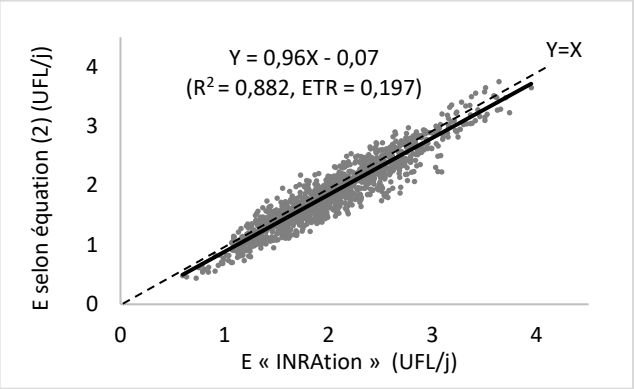

Figure 3 : Relation entre le terme correctif E calculé par l'équation (2) et E « INRAtion » (jeu de données de validation externe).

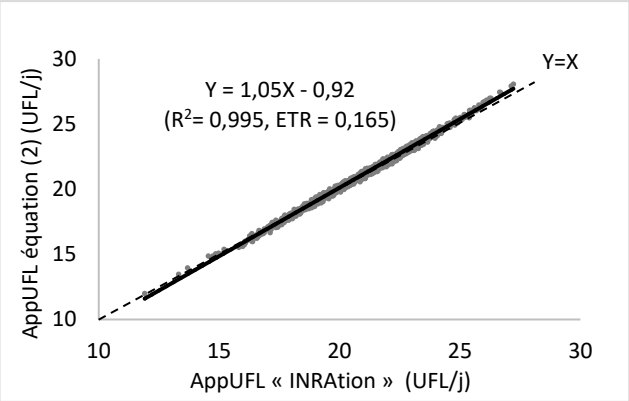

Figure 4 : Relation entre AppUFL calculé par l'équation (2) et AppUFL « INRAtion » (jeu de données de validation externe).

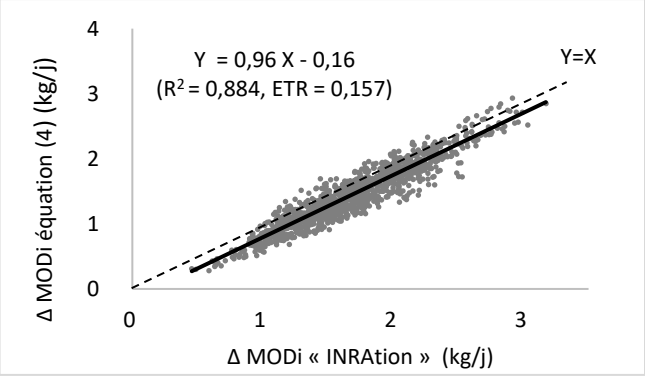

Figure 5 : Relation entre ∆ MODi calculé par l'équation (4) et ∆ MODi « INRAtion » (jeu de données de validation externe).

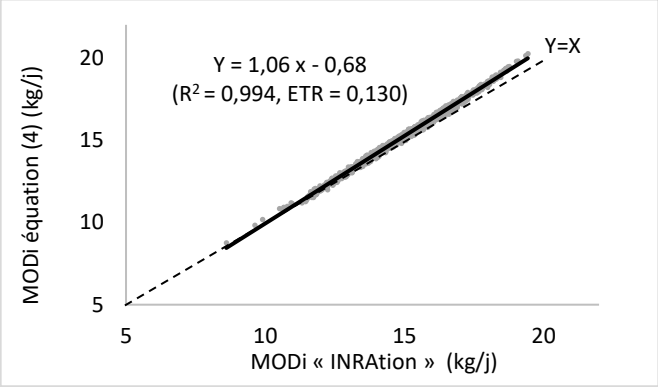

Figure 6 : Relation entre MODi calculé par l'équation (4) et MODi « INRAtion » (jeu de données de validation externe).

CONCLUSION

Selon les mêmes principes développés par l'INRA lors des versions précédentes des systèmes d'alimentation (1988 et 2007) et en intégrant l'approche plus mécaniste de l'évaluation des interactions digestives proposée en 2018, les termes associés à la teneur en concentré de la ration (PCO) et le niveau d'ingestion (NI) proposés par la présente étude ont permis d'évaluer *a postériori* et simplement les ID dans les rations des vaches laitières non carencées en protéines dégradables. L'estimation des apports énergétiques permis par une ration donnée (composition et quantités ingérées connues) et le calcul des bilans énergétiques issus d'une expérimentation portant sur l'alimentation sont de nouveau possibles sans le recours au logiciel INRAtion®V5.

Les auteurs tiennent à remercier Julien Jurquet et Amélie Fisher (Idèle) pour leur contribution à la validation des données, à partir des données expérimentales issues de travaux conduits à la ferme expérimentale des Trinottières.

Bibby, J., Toutenburg, H. 1977. John Wiley & Sons, London.
INRA, 1988. Alimentation des bovins, ovins, et caprins. INRA Editions, Paris, France.
INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins, et caprins. Editions Quae, Versailles, France.
INRA, 2018. Alimentation des ruminants. Editions Quae, Versailles, France.
Vermorel, M., Coulon, J.B., Journet, M., 1987. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 9-18.