

Estimation, pour les fourrages, de la dégradabilité des protéines (DT) dans le rumen et de la digestibilité réelle des protéines alimentaires dans l'intestin grêle (dr) : conséquences sur leurs valeurs PDI

M.O. NOZIERES (1), J.P. DULPHY (1), J.L. PEYRAUD (2), C. PONCET (1), R. BAUMONT (1)

(1) INRA-Theix, Unité de Recherche sur les Herbivores, 63122 Saint-Genès Champanelle

(2) INRA, Unité Mixte de Recherche - Production du Lait, 35590 Saint-Gilles

RESUME - Le système PDI permet d'évaluer la valeur azotée des aliments sur la base des protéines, d'origine alimentaire et microbienne, digestibles dans l'intestin grêle. En 1988, les valeurs de la dégradabilité théorique des protéines dans le rumen (DT en %) et de la digestibilité vraie des protéines alimentaires dans l'intestin (dr en %) avaient été définies par catégories de fourrages. Depuis, de nombreuses mesures ont montré que la DT d'un fourrage variait notamment selon la famille botanique, le cycle et le stade. Ce travail présente des méthodes d'estimation de la DT et de la dr qui seront intégrées dans les nouvelles tables de valeurs des fourrages. Pour les fourrages verts, nous avons rassemblé 375 mesures de DT (75,3 % en moyenne) que nous avons traitées par méta-analyses. Les variations de la DT sont prévues ($r^2 = 0,87$ et $r = 3,5$) à partir des teneurs en MAT du fourrage et en considérant des effets fixes pour la famille botanique et le numéro du cycle. La DT des fourrages conservés a été estimée en fonction de la DT du fourrage vert correspondant à partir d'une base de données comportant 29 couples verts - foin et 48 couples vert - fourrages fermentés. La DT des foin est plus faible que celle du vert (de 7,9 points en moyenne) et varie dans le même sens qu'elle. La DT des ensilages sans conservateur et des enrubbages est d'autant plus faible que le fourrage conservé est riche en MS et que la DT du vert est également plus faible. A même teneur en MS, la DT d'un ensilage avec conservateur représente 96 % de celle de l'ensilage sans conservateur correspondant. La dr des fourrages a été estimée en exploitant une base de 63 mesures du résidu azoté intestinal obtenu par la technique des sachets mobiles après avoir vérifié que le résidu des sachets correspondait à l'indigestible vrai. La teneur en protéines indigestibles et finalement la dr, sont modulées en fonction de la teneur en MAT du fourrage, de la famille, du numéro de cycle et du mode de conservation. Les modifications induites par l'utilisation de ces nouvelles estimations de DT et dr sur la valeur PDI des fourrages sont discutées.

Prediction of the rumen protein degradability (DT) and the true digestibility of dietary protein in the small intestine (dr) for forages: evaluation of their PDI values

M.O. NOZIERES (1), J.P. DULPHY (1), J.L. PEYRAUD (2), C. PONCET (1), R. BAUMONT (1)

(1) INRA-Theix, Unité de Recherche sur les Herbivores, 63122 Saint-Genès Champanelle

SUMMARY - The PDI system expresses the protein value of ruminant feeds in digestible proteins entering the small intestine. In order to calculate the PDI value of a forage, we must know its nitrogen ruminal degradability (DT in %) and the true digestibility of dietary proteins in the small intestine (dr in %). Due to the lack of experimental data, DT values for forages were set as fixed values in 1988, for example 73 % of crude protein (CP) content for all fresh forages. However, it was shown that DT is affected by botanical family, plant species, growth cycle and level of nitrogen fertilization, and decreases with plant maturity stage. To improve DT estimation, a database of 375 measurements for fresh forages was built. Analysis of the database using a mixed model to take into account laboratory effects revealed that DT can be predicted from the CP content of the forage, with a quadratic effect, and from botanical family and vegetation cycle effects ($r^2 = 0.87$; $RSD = 3.5$). Furthermore DT values of preserved herbage can be predicted from the corresponding values for fresh herbage for hays ($n = 29$; $r^2 = 0.71$; $RSD = 3.6$), and for fermented herbage (direct cut, wilted or big bale silage) in combination with dry matter content ($n = 32$; $r^2 = 0.53$; $RSD = 4.2$). Forage dr values were calculated from the dietary proteins entering the intestine ($1.11 \times CP \times (1-DT)$) and from the truly indigestible dietary protein (IDN). We proposed to predict IDN from forage characteristics (CP, botanical family, vegetation cycle) using an equation calculated on data of mobile intestinal nylon bags ($n=63$; $r^2=0.50$; $RSD=2.1$). Those equations will be incorporated in the INRA PDI system.

INTRODUCTION

Le système PDI (Vérité *et al.*, 1987) permet d'exprimer la valeur azotée des aliments ainsi que les besoins des animaux en protéines digérées dans l'intestin (PDI en g/kg). A la sortie du rumen, ces protéines sont réparties en deux fractions : la fraction alimentaire (PDIA) et la fraction microbienne (PDIM). La valeur PDIA des aliments dépend de deux variables, la dégradabilité théorique des protéines dans le rumen (DT) et la digestibilité réelle des acides aminés d'origine alimentaire dans l'intestin grêle (dr). Pour la fraction microbienne, deux valeurs sont attribuées pour chaque aliment, selon que l'on considère que l'énergie fermentescible est le facteur limitant de l'activité microbienne (PDIME) ou que c'est la quantité d'azote dégradable (PDIMN).

En 1988, faute d'un nombre suffisant de données expérimentales, les DT et les dr des fourrages avaient été fixées par grandes catégories (tableau 1).

Tableau 1 : valeurs de DT et dr par catégories de fourrages - 1988

	DT (%)	dr (%)
Fourrages verts	73	75
Ensilages sans conservateur	78	70
Ensilages avec conservateur	70	65
Ensilages préfanés	75	60
Foins	66	65

Plusieurs travaux ont montré que la DT des fourrages variait, notamment, selon la famille botanique, l'espèce considérée, le stade ou l'âge des repousses (Le Goffe, 1991, Antoniewicz *et al.*, 1995, Aufrère *et al.*, 2000). Pour les graminées, elle est plus élevée au premier cycle qu'aux cycles suivants (Le Goffe, 1991). Elle varie aussi avec le niveau de fertilisation (Peyraud et Astigarraga, 1998). En ce qui concerne les fourrages conservés, la DT diminue avec l'intensité de préfanage (Verbic *et al.*, 1996).

La dr, calculée à partir des protéines non dégradées dans le rumen et de la quantité de protéines alimentaires non digérées dans l'intestin grêle (PANDI), varie selon les aliments (Vérité *et al.*, 1987). En 1988, faute de mesures directes suffisamment nombreuses, les PANDI avaient été estimées à partir d'une analyse mathématique des quantités totales de matières azotées non digestibles retrouvées dans les fèces. Depuis, des mesures des matières azotées résiduelles par la méthode des sachets mobiles (MARS) sont disponibles pour estimer plus directement les PANDI.

L'objectif de ce travail est de mieux prendre en compte les sources de variation de la DT et de la dr pour préciser les valeurs PDI des fourrages des tables. Pour cela, nous avons rassemblé des données provenant de l'INRA et de laboratoires étrangers, à partir desquelles nous proposons des équations de prévision de la DT et des PANDI en fonction des caractéristiques du fourrage. Les conséquences sur les valeurs PDI sont ensuite analysées.

1. DT DES FOURRAGES VERTS

1.1. MATERIEL ET METHODES

Une base homogène des données disponibles a été constituée, en considérant les critères suivants :

- la méthode de mesure utilisée devait être la méthode des sachets de nylon (Michalet-Doreau *et al.*, 1987, revue ou non par Dulphy *et al.*, 1999).

- La description du fourrage devait comprendre au moins la famille, l'espèce, le numéro de cycle et la teneur en Matières Azotées Totales (MAT).

Les données proviennent d'une part, de l'INRA : URH de Theix (5 essais, 57 échantillons) et UMR-PL de Rennes (6 essais, 157 échantillons) et d'autre part, de 8 publications européennes provenant des Pays-Bas, du Royaume-Uni, de Pologne et d'Espagne (10 essais et 138 échantillons). D'autres données ont également été obtenues de la Station fédérale de recherches en production animale et laitière (Posieux, Suisse, 16 échantillons ; Daccord, communication personnelle) et du Teagasc-Moorepark (Irlande, 7 échantillons ; Murphy, communication personnelle). La base de données contient 375 valeurs de DT (tableau 2).

Tableau 2 : base de données DT des fourrages verts (n = 375)

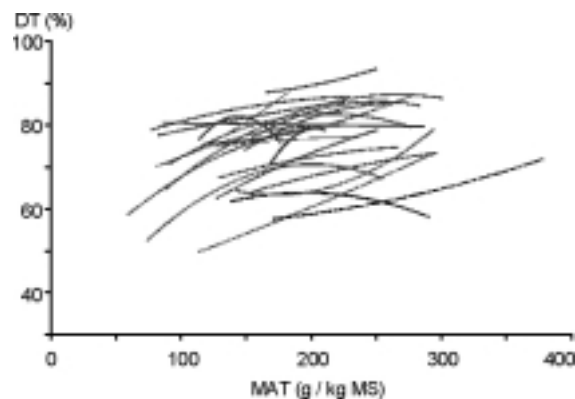
	N	DT (%)	MAT (g/kg MS)
Graminées cycle 1	60	80,9 ± 6,5	150,2 ± 52,4
Graminées autres cycles	141	73,9 ± 8,5	196,7 ± 60,9
Légumineuses cycle 1	43	81,4 ± 4,9	184,5 ± 46,4
Légumineuses autres cycles	33	81,4 ± 4,8	204,9 ± 49,1
Prairies permanentes cycle 1	31	73,6 ± 9,0	157,5 ± 53,7
Prairies permanentes autres cycles	67	67,2 ± 8,3	194,1 ± 41,9

Deux espèces sont majoritairement représentées : le *ray-grass* anglais (37 % des échantillons) et la luzerne (13 %). *Dactyle*, *fétuque*, *ray-grass* hybride, d'Italie et brome sont les autres graminées représentées et les trèfles blanc et violet les autres légumineuses.

La méthode d'analyse choisie est celle décrite par Sauviant *et al.*, 2004. Un effet "publication / essai" a été considéré. Il permet de prendre en compte les différences de méthodologie (type de sachets, conservation et présentation des échantillons,...), mais également le fait que les essais regroupés ont des objectifs différents : effets du stade de récolte du fourrage, de la fertilisation azotée sur les valeurs de DT. Nous avons conservé 23 "publication / essai" en ne considérant que les modalités qui contiennent au moins

3 mesures de DT. Les analyses de variance-covariance ont été effectuées à l'aide de la procédure mixte de SAS pour pouvoir considérer l'effet "publication / essai" comme un effet aléatoire. Nous avons testé les effets fixes suivant : famille botanique (graminées, légumineuses, prairies permanentes), espèces et cycle de végétation indépendamment de la famille. La co-variable choisie est la teneur en MAT (figure 1) qui varie de façon étroite avec le stade de récolte et / ou la fertilisation azotée.

Figure 1 : ajustements intra-essais de la DT avec la teneur en MAT (23 essais, 375 données au total)



1.2. RESULTATS

L'équation intra-essais retenue pour calculer les valeurs de DT des fourrages verts est :

$$DT = 51,2 + 0,14 MAT - 0,00017 MAT^2 + 8,8 (\text{graminées - cycle 1}) + 4,6 (\text{graminées - autres cycles}) + 6,8 (\text{légumineuses - tous cycles}) + 4,4 (\text{prairies permanentes - cycle 1}) + 0 (\text{prairies permanentes - autres cycles})$$

(n = 375, r² = 0,87, etr = 3,5, MAT en g/kg MS)

L'analyse statistique confirme que la DT varie de façon importante et curvilinéaire avec la MAT. La DT s'accroît de 5 points pour un accroissement de la MAT de 100 à 150 g/kg MS et de 4 points supplémentaires entre 150 et 200 g/kg MS. Quelle que soit la source de variation de la MAT (niveau de fertilisation azotée, stade de végétation...), la variation de DT prévue par le modèle est de même ampleur, ce qui est cohérent avec les résultats de Van Vuuren *et al.*, 1991 et de Peyraud *et al.*, (non publié). L'ajout d'une autre co-variable traduisant le stade de développement du fourrage, comme la teneur en NDF, n'améliore pas la précision du modèle.

A même MAT, la DT varie significativement avec la famille botanique. En particulier, les prairies naturelles sont nettement moins dégradables que les graminées et que les légumineuses. L'introduction d'un effet espèce n'améliore pas sensiblement la précision du modèle. Nous avons retenu l'effet "famille", plus global et plus facilement utilisable. L'interaction de pente entre la co-variable MAT et l'effet "famille" apparaît significative mais n'améliore pas sensiblement la précision du modèle. Elle n'a donc pas été conservée.

La DT est plus élevée pour le premier cycle que pour les suivants. Ces derniers, non significativement différents entre eux, ont été regroupés. L'interaction "famille-cycle" a été prise en compte, car cet effet du cycle existe dans le cas des graminées et des prairies naturelles, mais n'existe pas dans le cas des légumineuses.

2. DT DES FOURRAGES CONSERVES

La démarche que nous avons adoptée a été définie en cohérence avec les Tables de la Valeur Alimentaire des Fourrages dans lesquelles la valeur du fourrage conservé est estimée à partir de celle du fourrage vert de départ (INRA, 1988). L'analyse des données en correspondance dont nous disposons révèle que la DT du fourrage conservé est significativement liée à celle du fourrage vert de départ. Nous proposons deux équations, une pour les foin et une pour les fourrages fermentés (ensilages directs, préfanés et fourrages mi-fanés enrubannés (BRE)). Des équations de prévision de la DT des fourrages conservés à partir de leur composition chimique pourront être proposées ultérieurement.

2.1. DT DES FOINS

Nous disposons de 29 données de DT mesurées sur des foin et sur les fourrages verts initiaux (tableau 3), correspondant à deux essais menés à l'URH-Theix (Michalet-Doreau et Ould-Bah, 1992 ; Dulphy *et al.*, non publié).

Tableau 3 : base de données - DT des foin (n = 29)

	N	DT _{vert} (%)	DT (%)
Graminées- cycle 1	15	78,5 ± 5,3	70,2 ± 6,9
Graminées - autres	4	76,0 ± 5,7	70,3 ± 3,2
Légumineuses - cycle 1	7	80,4 ± 3,1	72,6 ± 4,9
Légumineuses - autres	3	85,8 ± 3,2	76,6 ± 8,7

Les espèces les plus représentées sont le *ray-grass* anglais (24 % du total), le dactyle (28 %) et la luzerne (31 %). Les données ont été traitées par analyse de covariance et, comme précédemment, l'effet "essai" a été considéré comme un effet aléatoire.

La DT des foin varie dans le même sens que celle des fourrages verts, mais dans de plus faibles proportions. L'ajout d'une autre co-variable (MAT, NDF) ou d'un effet "famille" n'améliore pas le modèle.

$$DT_{\text{foin}} = 17,08 + 0,68 DT_{\text{vert}} \quad (n = 29 \quad r^2 = 0,71 \quad \text{etr} = 3,6)$$

2.2. DT DES FOURRAGES FERMENTES

Les données dont nous disposons pour cette analyse (tableau 4) proviennent de l'URH-Theix et de la Station fédérale de recherches en production animale et laitière (Posieux, Suisse, Daccord, communication personnelle).

Tableau 4 : base de données - DT des fourrages fermentés (SC = sans conservateur ; AC = avec conservateur) (n = 48)

	N	MS (%)	DT _{vert} (%)	DT (%)
Ensilages directs SC	8	20,3	80,5	88,7
Ensilages directs AC	8	20,6	80,5	85,6
Ensilages préfanés SC	16	28,1	71,3	79,1
Ensilages préfanés AC	8	28,6	73,0	79,5
BRE < 55 % MS	4	45,6	83,4	82,0
BRE > 55 % MS	4	63,1	80,9	77,0

Pour les ensilages directs et préfanés nous avons distingué les fourrages préparés avec et sans conservateur (type acide formique). Pour une même DT du fourrage vert initial et une même teneur en matière sèche (MS, en %) de l'ensilage, la DT de l'ensilage avec conservateur est inférieure à celle de l'ensilage sans conservateur du fait d'une moindre quantité d'N soluble.

Pour les fourrages fermentés sans conservateur l'équation retenue est la suivante :

$$DT_{\text{fourrage fermenté SC}} = 46,5 + 0,56 DT_{\text{vert}} - 0,25 MS \quad (n = 32, r^2 = 0,53 \quad \text{etr} = 4,2, \text{ MS en } \%)$$

Cette équation traduit le fait que la DT d'un fourrage fermenté est d'autant plus faible que le fanage est poussé. Ainsi la DT des BRE (79,5 % en moyenne) est intermédiaire

entre celle des ensilages (88,3 %) et des foin (71,5 %). La pente relative à la MS ne diffère pas significativement dans la plage de variation de ce critère mesuré sur les ensilages (de 15 à 35 % MS), d'une part et entre les ensilages et les BRE, d'autre part. Cette équation a donc une portée générale, si ce n'est qu'elle n'a été établie qu'avec des ensilages correctement conservés, la base de données ne comportant que 2 fourrages ayant des teneurs en N soluble supérieure à 60 %.

Nous disposons de 16 couples pour tester l'effet des conservateurs. La DT des ensilages avec conservateur est directement liée à celle prévue pour l'ensilage sans conservateur correspondant :

$$DT_{\text{ensilage AC}} = 0,96 DT_{\text{ensilage SC}} \quad (n = 16, r^2 = 0,83 \quad \text{etr} = 1,8)$$

3. DIGESTIBILITE REELLE DES PROTEINES

Dans le système PDI, la dr se calcule ainsi :

$$dr = (1,11 \times (1 - DT) \times MAT) - PANDI / 1,11 \times (1 - DT) \times MAT$$

Son estimation nécessite, outre celle de la DT, celle des PANDI. Ces dernières peuvent être estimées à partir de la méthode des sachets mobiles dans l'intestin. Dans cette technique, l'aliment, après avoir subi une phase de digestion dans le rumen, est enfermé dans un sachet de nylon, introduit dans l'intestin et récupéré dans les bouses. On évalue ensuite la quantité de protéines résiduelles contenues dans les sachets (MARSM). Nous avons rassemblé 63 mesures de ce type obtenues à l'URH Theix et à l'UMR-PL (tableau 5). Pour vérifier que l'on peut effectivement assimiler les MARSM aux PANDI, nous avons procédé à l'analyse mathématique des 51 données parmi les 63 pour lesquelles nous disposons des quantités totales de matière azotée non digestibles (MAND) retrouvées dans les fèces. Le coefficient de régression des MARSM dans l'analyse des MAND (Vérité *et al.*, 1987) n'étant statistiquement pas différent de 1 (1,1 ± 0,5) nous avons assimilé les PANDI à la mesure de MARSM.

Tableau 5 : base de données - MARSM (n = 63)

	N	MAT (g/kg MS)	MARSM (g/kg MS)
Fourrages verts	24	160,2 ± 49,6	7,9 ± 3,0
Ensilages	14	145,7 ± 29,4	9,4 ± 2,5
Enrubannages	12	141,4 ± 35,7	11,3 ± 2,0
Foin	13	113,1 ± 36,8	9,8 ± 2,5

Nous avons effectué sur les 63 données une analyse de variance-covariance avec comme effets fixes la famille botanique, le cycle de végétation et le mode conservation et comme co-variable la MAT. L'équation retenue pour calculer les valeurs de PANDI est :

$$PANDI = 7,9 + 0,08 MAT - 0,00033 MAT^2$$

- 1,9 (cycle1) et 0 pour les autres cycles
 - 2,3 (graminées/prairies permanentes et 0 pour les légumineuses
 - 2,0 (fourrage vert), -0 (fourrage conservé)
- (n = 63, r² = 0,50, etr = 2,1, PANDI et MAT en g/kg de MS)

La valeur de PANDI est d'autant plus faible et donc la dr est d'autant plus élevée que le fourrage est riche en MAT. A même MAT, les PANDI sont plus faibles au premier cycle que pour les repousses. Elles sont plus faibles pour les graminées et les prairies permanentes que pour les légumineuses et pour les fourrages verts comparés aux fourrages conservés. Toutefois les effets de ces facteurs sur la dr sont à pondérer des variations conjointes de la DT.

4. CONSEQUENCES SUR LES VALEURS PDI

Nous illustrons l'impact des modèles présentés sur les valeurs de DT, de dr et sur les valeurs PDI, à l'aide de l'exemple du *ray-grass* anglais.

4.1. VALEURS DE DT ET DE dr

En utilisant les équations de prévision de DT et de PANDI, nous obtenons de nouvelles valeurs de DT et de dr (tableau 6), par rapport à celles de 1988 (tableau 1) :

Tableau 6 : nouvelles valeurs de DT (%) et de dr (%) pour le *ray-grass* anglais - 1^{er} cycle)

		MAT (g/kg MS)	DT	dr
Début Epiaison	Fourrage vert	142	76,0	81,5
	Ensilage SC (19% MS)	141	84,4	63,1
	Ensilage AC (19% MS)	141	81,0	69,7
Epiaison	Fourrage vert	120	74,0	79,7
	Foin	115	67,8	78,1

Les fourrages verts récoltés à des stades précoces sont plus dégradables que ceux récoltés à des stades tardifs. Les DT des ensilages sont globalement plus élevées que les valeurs fixées en 1988. La différence entre ensilage SC et ensilage AC est d'environ 3 points. Cet écart est plus faible que celui fixé en 1988 à 8 points. On peut supposer que la qualité de conservation des ensilages SC étudiés récemment est meilleure qu'auparavant. A des stades d'exploitation courants, les nouvelles DT des foins sont en moyenne identiques à la DT de 1988.

Les dr sont supérieures aux dr de 1988. Elles sont en moyenne de 80 %, valeur retenue en 1988 pour la digestibilité intestinale des protéines d'origine microbienne. En revanche, elles restent faibles pour les ensilages du fait de la forte augmentation des DT.

4.2. VALEURS PDI

Les modifications des valeurs PDI portent essentiellement sur les PDIA. Les valeurs PDIMN et PDIA évoluant en sens contraire, les valeurs PDIN des fourrages ne sont quasiment pas modifiées. Nous avons choisi de présenter l'impact des nouvelles valeurs de DT et de dr sur la valeur PDIE du *ray-grass* anglais.

Par rapport à 1988 (figure 2), la valeur PDIE des premiers cycles diminue pour les stades précoces et celle des autres cycles augmente de 3g/kg MS en moyenne. En ce qui concerne les fourrages conservés (figure 3), la valeur PDIE des foins est augmentée de 2 à 3 g/kg MS. L'écart entre la valeur PDIE des ensilages SC et des ensilages AC est réduit. La modification la plus importante concerne les ensilages AC dont la valeur PDIE diminue de 8 g/kg MS.

Figure 2 : comparaison des PDIE prévus et des PDIE 1988 *ray-grass* anglais - fourrage vert

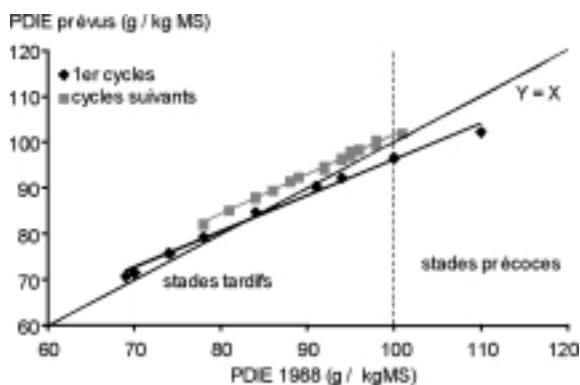
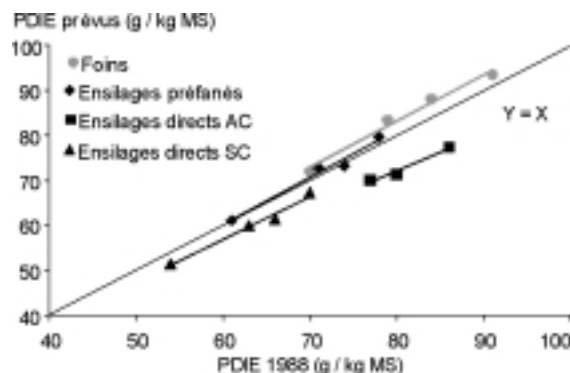


Figure 3 : comparaison des PDIE prévus et des PDIE 1988 *ray-grass* anglais - fourrages conservés - tous cycles confondus



CONCLUSION

Les valeurs de DT et de dr des fourrages reposent maintenant sur l'analyse de bases de données importantes, ce qui permet de prendre en compte les principaux facteurs de variation de ces deux variables (stade, famille, cycle, mode de conservation). La construction de modèles de prévision de la DT et de la dr des fourrages verts et conservés permet d'évaluer, de façon plus fine qu'auparavant, la valeur PDI des fourrages. Nous les retenons pour les valeurs PDI des fourrages des tables.

Nous remercions J. Murphy (Teagasc) et R. Daccord (Posieux, Suisse) de nous avoir communiqué des données.

- Aufrère J., Graviou D., Baumont R., Detour A., Demarquilly C., 2000. Ann. Zoot., 49, 461-474.
 Antoniewicz A.M., Kowalczyk J., Kanski J., Gorska-Matusiak Z., Nalepka M., 1995. Anim Feed Sci. Tech. 54. 203-216
 Dulphy J.P., Demarquilly C., Baumont R., Jailler M., L'Hotelier L., Dragomir C., 1999. Ann. Zoot. 48. 275- 288
 INRA, 1988. Tables de l'alimentation des ruminants. INRA Pub
 Le Goffe, 1991. Thèse de Doctorat de l'ENSA de Rennes, 82p.
 Michalet Doreau B., Ould-Bah M.Y., 1992. J. Dairy Sci. 75. 782-788
 Michalet-Doreau B., Vérité R., Chapoutot P., 1987. Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix. 69. 5-7
 Peyraud J.L., Astigarraga L., 1998. Anim. Feed. Sci. Technol., 72, 235-259.
 Sauvart D., Schmidely P., Daudin J.J., 2004. INRA Prod. Anim. 18, 63-73
 Van Vuuren A.M., Tamminga S., Ketalaar R.S., 1991. J Agric. Sci. 116. 429-436
 Verbic J., Babnik D., 1996. Kmiva 38. Zagreb 5. 269-277
 Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C., 1987. Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix. 70. 35-49