

La valeur azotée des fourrages.

Nouvelles estimations de la dégradabilité des protéines dans le rumen et de la digestibilité réelle des protéines alimentaires dans l'intestin grêle : conséquences sur les valeurs PDI

M.-O. NOZIERES¹*, J.-P. DULPHY¹, J.-L. PEYRAUD², C. PONCET¹, R. BAUMONT¹

¹ INRA, UR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès Champanelle, France

* Adresse actuelle : INRA, UE57 Domaine expérimental de Saint-Laurent de la Prée, F-17450 Saint-Laurent-de-la-Prée, France

² INRA, Agrocampus, UMR1080 Production du lait, F-35590 Saint-Gilles, France

Courriel : rene.baumont@clermont.inra.fr

Le système PDI (Vérité *et al* 1987) permet d'exprimer la valeur azotée des aliments ainsi que les besoins des animaux en protéines digestibles 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'énergie fermentescible est le facteur limitant de l'activité microbienne (PDIME) ou que c'est la quantité d'azote dégradable (PDIMN).

Lors de l'élaboration des Tables INRA 1988 (Andrieu *et al* 1988), les données expérimentales permettant d'estimer les facteurs de variation de la DT des fourrages étaient peu nombreuses. En conséquence, des valeurs fixes de DT avaient été données par type de fourrage en distinguant seulement pour l'herbe les fourrages verts, les différents types d'ensilages et les foins. Ainsi la DT avait été fixée à 73 % pour tous les fourrages verts et à 66 % pour tous les foins. Ces valeurs ne rendaient pas compte des variations de DT, selon la famille botanique, l'espèce considérée, le stade de végétation ou l'âge des repousses (Le Goffe 1991, Antoniewicz *et al* 1995, Aufrère *et al* 2000). De même, il a été montré que pour les gra-

minées, la DT est plus élevée au premier cycle qu'aux cycles suivants (Le Goffe 1991) et qu'elle varie aussi avec le niveau de fertilisation (Peyraud et Astigarraga 1998). En ce qui concerne l'herbe conservée, la DT diminue pour un fourrage donné avec son degré de fanage (Verbic et Babnik 1996, Dulphy *et al* 1999), depuis la récolte en ensilage jusqu'à la récolte en foin. L'effet du mode de conservation avait été pris en compte en 1988, mais des données complémentaires ont été acquises depuis.

La *dr* se calcule à partir des protéines non dégradées dans le rumen et de la quantité de protéines alimentaires non digérées dans l'intestin grêle (PANDI) :

$$dr = (PIA - PANDI)/PIA, \text{ avec } PIA = 1, 11 \times (1 - DT) \times MAT$$

En 1988, des valeurs fixes de *dr* avaient été données pour les mêmes catégories de fourrages en distinguant toutefois les graminées et les légumineuses. Les valeurs de PANDI avaient été estimées à partir d'une analyse mathématique des quantités totales de matières azotées non digestibles retrouvées dans les fèces. Seules quelques mesures par la technique des sachets mobiles dans l'intestin avaient permis une première approche expérimentale de la quantité de protéines alimentaires réellement non digestibles des aliments à partir des quantités de matières azotées non disparues des sachets (MANDS) (Peyraud *et al* 1988a, b). Brièvement, dans la tech-

nique des sachets mobiles, le fourrage est enfermé dans un sachet de nylon, incubé dans le rumen puis il subit une hydrolyse dans un bain de pepsine (simulant la caillette), est introduit dans l'intestin et récupéré dans les déjections. Le résidu MANDS est un indicateur des quantités de protéines réellement non digestibles. Ces mesures avaient alors permis une certaine validation de la méthode par calcul lorsque l'on considérait les grandes catégories de fourrages (Vérité *et al* 1987). Depuis, un nombre plus important de mesures des MANDS a été obtenu, permettant ainsi d'estimer les facteurs de variations des PANDI.

Pour élaborer les nouvelles Tables INRA de la valeur des fourrages (Baumont *et al* 2007), nous avons cherché à établir des modèles de prévision de la DT et de la *dr* afin de mieux prendre en compte les sources de variation de ces deux critères dans le calcul des valeurs PDI des fourrages. Pour cela, nous avons rassemblé les mesures de DT et de MANDS obtenues à l'INRA, complétées pour la DT par des données obtenues dans d'autres laboratoires européens. Ces données nous permettent de proposer des équations de prévision de la DT et des PANDI en fonction des caractéristiques du fourrage. Nous les avons ensuite utilisées pour recalculer les valeurs PDI des différents types de fourrages. Nous présentons ici les données utilisées, les équations de prévision obtenues et nous en illustrons

les conséquences sur les valeurs PDI. Une version préliminaire de ce travail a été présentée par Nozières *et al* (2005).

1 / Les données utilisées

Pour estimer la DT des fourrages verts, une base homogène des données disponibles a été constituée, en considérant les critères suivants : i) 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) ; ii) 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 de Theix (Ould-Bah 1989, Amrane et Michalet-Doreau 1993, Dulphy *et al* non publié) soit 5 essais et 57 échantillons, et de Rennes (Le Goffe 1991, Le Goffe *et al* 1993a, b, Peyraud *et al* non publié) soit 6 essais et 157 échantillons, et d'autre part, de 8 publications européennes (Beever *et al* 1986, Van Vuuren *et al* 1991, 1992, Waters et Givens 1992, Antoniewicz *et al* 1995, Valk *et al* 1996, Gonzalez *et al* 2001, Cone *et al* 2004) soit 10 essais et 138 échantillons. Des données obtenues à la Station fédérale de Recherches en production animale et laitière (Posieux, Suisse, 16 échantillons ; Daccord comm. pers.) et au Teagasc-Moorepark (Irlande, 7 échantillons ; Murphy comm. pers.) ont été également incluses dans la base. Au total, la base de données contient 375 valeurs de DT.

Les valeurs moyennes de DT et de MAT sont données dans le tableau 1 en distinguant les graminées, les légumineuses et les prairies permanentes. Deux espèces sont majoritairement représentées dans la base de données : le ray-grass anglais (37 % du total des échantillons) et la luzerne (13 %). La fétuque (7 %), le dactyle (4 %), le ray-grass hybride (2 %), le ray-grass d'Italie (2 %) et le brome (2 %) sont les autres graminées représentées et le trèfle violet (5 %) et le trèfle blanc (2 %) les autres légumineuses. Les légumineuses, plus riches en MAT, sont aussi les fourrages qui ont les dégradabilités les plus élevées, suivies par les graminées et les prairies permanentes. Pour ces deux dernières familles, il apparaît que la DT des fourrages récoltés au premier cycle de végétation est plus élevée que celle des fourrages récoltés aux cycles suivants.

Tableau 1. Matières azotées totales (MAT) et dégradabilité de l'azote dans le rumen (DT) des fourrages verts ayant servi à établir le modèle de prévision de la DT (N = 375).

	N	MAT (g/kg MS)	DT (%)
Graminées 1 ^{er} cycle	60	150 ± 52	80,9 ± 6,5
Graminées autres cycles	141	197 ± 61	73,9 ± 8,5
Légumineuses 1 ^{er} cycle	43	185 ± 46	81,4 ± 4,9
Légumineuses autres cycles	33	205 ± 49	81,4 ± 4,8
Prairies permanentes 1 ^{er} cycle	31	158 ± 54	73,6 ± 9,0
Prairies permanentes autres cycles	67	194 ± 42	67,2 ± 8,3

Pour estimer la DT des fourrages conservés, nous avons adopté la démarche utilisée pour construire les tables de la valeur alimentaire des fourrages qui consiste, chaque fois que cela est possible, à estimer la valeur du fourrage conservé à partir de celle du fourrage vert de départ. Nous n'avons donc considéré que des données pour lesquelles la DT du même fourrage avait été mesurée sur le fourrage vert et sur un fourrage conservé correspondant.

Pour les fourrages fermentés, nous avons pu rassembler 48 comparaisons avec des fourrages verts correspondants (tableau 2). Les données proviennent de l'INRA de Theix (Dulphy *et al* non publié, 10 mesures avec des graminées, 2 avec des prairies permanentes et 12 avec des légumineuses) et de la Station fédérale de Recherches en production animale et laitière (24 mesures avec des prairies permanentes réalisées à Posieux, Suisse, Daccord comm. pers.). Ces données permettent de considérer les différents types d'ensilage d'herbe depuis l'ensilage réalisé en coupe directe brins courts jusqu'aux fourrages mi-fanés récoltés en

enrubannage. L'écart entre la DT du fourrage vert et celle du fourrage fermenté se réduit avec l'intensité du fanage. Ainsi la DT de l'ensilage réalisé en coupe directe sans conservateur est supérieure de 8 points à celle du fourrage vert correspondant et cet écart devient nul pour les ensilages mi-fanés enrubannés.

Pour les foins, nous avons pu rassembler les données de 29 fourrages pour lesquels la DT a été mesurée en comparaison avec celle du fourrage vert initial (tableau 3). Ces données proviennent de deux essais menés à l'INRA de Theix (Michalet-Doreau et Ould-Bah 1992, Dulphy *et al* non publié). Les espèces les plus représentées sont le ray-grass anglais (24 % du total), le dactyle (28 %) et la luzerne (31 %). La DT des foins est inférieure de 6 à 9 points à celles des fourrages verts de départ sans que l'on puisse mettre en évidence d'effets liés à la famille botanique ou au cycle de végétation.

Pour estimer les quantités de matières azotées d'origine alimentaire réellement non digérées dans l'in-

Tableau 2. Dégradabilité de l'azote (DT) des fourrages fermentés. SC = sans conservateur ; AC = avec conservateur) étudiés en comparaison avec les fourrages verts correspondants (N = 48).

	N	MS (%)	DT _{vert} (%)	DT (%)
Ensilages directs SC	8	20,3 ± 2,3	80,5 ± 5,4	88,7 ± 2,7
Ensilages directs AC	8	20,6 ± 1,9	80,5 ± 5,4	85,6 ± 3,2
Ensilages préfanés SC	16	28,1 ± 4,4	71,3 ± 4,0	79,1 ± 3,9
Ensilages préfanés AC	8	28,6 ± 2,5	73,0 ± 2,7	79,5 ± 2,9
Ensilages mi-fanés (MS < 55 %)	4	45,6 ± 5,4	83,4 ± 3,7	82,0 ± 6,8
Ensilages mi-fanés (MS > 55 %)	4	63,1 ± 5,8	80,9 ± 1,6	77,0 ± 6,1

Tableau 3. Dégradabilité de l'azote (DT) des foins étudiés en comparaison avec les fourrages verts correspondants (N = 29).

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

Tableau 4. Matières azotées totales (MAT) et matières azotées non dégradées dans les sachets mobiles après séjour dans l'intestin (MANDS) des fourrages ayant servi à établir le modèle de prévision des MANDS (N=63).

	N	MAT (g/kg MS)	MANDS (g/kg MS)
Fourrages verts			
Graminées 1 ^{er} cycle	7	124 ± 32	6,7 ± 2,1
Graminées autres cycles	5	152 ± 33	8,7 ± 2,6
Légumineuses 1 ^{er} cycle	7	178 ± 50	8,3 ± 4,2
Légumineuses autres cycles	5	196 ± 57	8,1 ± 2,7
Fourrages conservés			
Graminées 1 ^{er} cycle	17	118 ± 37	8,6 ± 2,2
Graminées autres cycles	6	147 ± 30	10,4 ± 0,7
Légumineuses 1 ^{er} cycle	11	135 ± 24	10,9 ± 2,2
Légumineuses autres cycles	5	168 ± 40	13,0 ± 1,2

testin, nous avons rassemblé 63 mesures réalisées par la méthode des sachets mobiles issus de travaux conduits à l'INRA de Theix et de Rennes. La base de données contient 29 mesures sur des graminées, 28 sur des légumineuses et seulement 6 sur des prairies permanentes ce qui nous a conduit à regrouper ces dernières avec les graminées. Les valeurs moyennes des MANDS sont présentées dans le tableau 4 en distinguant les fourrages verts des fourrages conservés, les graminées des légumineuses et les premiers cycles de végétation des cycles suivants. Les quantités de MANDS sont globalement plus faibles pour les fourrages verts que pour les fourrages conservés, avec des valeurs qui peuvent être inférieures à 5g/kg de MS pour des ray-grass anglais et des trèfles blancs exploités en vert.

2 / Les équations de prévision de la DT et de la *dr*

Afin de mieux prendre en compte les facteurs de variation de la DT et de la *dr* des fourrages, nous avons établi à partir des bases de données présentées ci-dessus des équations de prévision de la DT et des PANDI. La démarche générale que nous avons suivie a été de combiner une variable continue toujours estimée lors d'une analyse fourragère, la teneur en MAT du fourrage (et la teneur en MS pour prévoir la DT de l'herbe ensilée), et des critères simples caractérisant le type de fourrage (famille botanique et cycle de végétation). Pour les fourrages pour lesquels nous ne disposions pas de données, ou pour lesquels il n'a pas été possible d'établir des équations de prévision satisfaisantes (cas de l'ensilage de maïs), nous avons conservé les

valeurs de DT et de *dr* fixées en 1988 et qui sont rappelées au tableau 6.

2.1 / Prévision de la DT

a) Les fourrages verts

L'équation de prévision de la DT des fourrages verts a été établie à partir d'une méta-analyse de la base de données selon la méthode décrite par Sauvage *et al* (2005). Pour prendre en compte les différences de méthodologie (type de sachets, conservation et présentation des échantillons...), et le fait que les essais regroupés dans la base avaient des objectifs différents d'un essai à l'autre (étude des effets du stade de récolte du fourrage ou de la fertilisation azotée) un effet «publication/essai» a été considéré. Nous avons ainsi regroupé les données en 23 «publications/essais» (figure 1). 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. L'équation retenue (tableau 5) prend en compte l'effet curvilinéaire de la teneur en MAT, les effets de la famille botanique (graminées, légumineuses, prairies permanentes), et du cycle de végétation en distinguant le premier des suivants. L'écart type résiduel de l'équation est de 3,5 points de dégradabilité, ce qui représente environ 5 % des valeurs de DT.

Contrairement à l'hypothèse d'une valeur fixe adoptée en 1988, l'équation de prévision traduit le fait que la DT des fourrages augmente de façon curvilinéaire avec leur teneur en MAT. Ainsi, 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. L'analyse de la base de données montre que les variations de DT sont de même ampleur que la variation de la teneur en MAT soit liée au niveau de fertilisation azotée ou au stade de végétation. Cela est cohérent avec les résultats de Van Vuuren *et al* (1991) et de Peyraud *et al* (non publié). Enfin, l'ajout d'une autre covariable traduisant le stade de développement du fourrage, comme la teneur en NDF, n'améliore pas la précision du modèle.

L'effet significatif de la famille botanique révèle qu'à même teneur en MAT, la DT des prairies permanentes est plus faible que celle des graminées

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

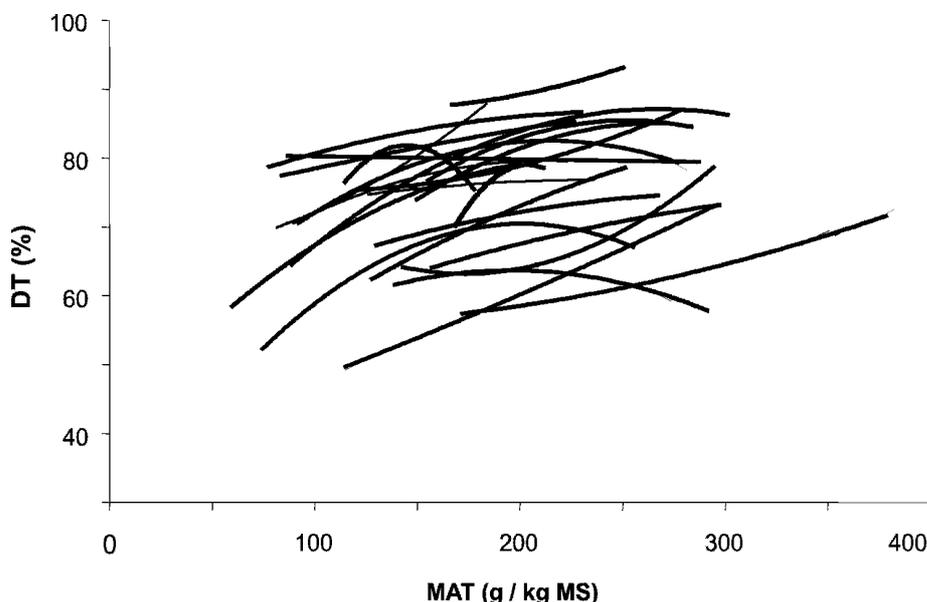


Tableau 5. Equations utilisées pour estimer la DT (%) et la dr (%) des fourrages à base d'herbe en fonction des teneurs en MAT (g/kgMS), de la teneur en MS (%) pour les ensilages, et des caractéristiques des fourrages.

Estimation des valeurs de DT	N	Equation	R ²	ETR
Fourrages verts	375	$DT_{FV} = 51,2 + 0,14MAT_{FV} - 0,00017MAT_{FV}^2 + \Delta_{FV}$	0,87	3,5
Ensilages et foins : estimation à partir de la connaissance du fourrage vert correspondant				
Ensilages sans conservateur ⁽¹⁾	32	$DT = 46,5 + 0,56DT_{FV} - 0,25MS_{Ensilage}$	0,53	4,2
Ensilages avec conservateur	16	$DT = 0,96DT_{Ensilage \text{ sans conservateur}}$	0,83	1,8
Foins	29	$DT = 17,08 + 0,68DT_{FV}$	0,71	3,6
Ensilages et foins : estimation à partir de leur composition ⁽²⁾				
Ensilages sans conservateur ⁽¹⁾		$DT = 73,7 + 0,088MAT - 0,00011MAT^2 - 0,25MS + \Delta_{Ensilage}$		
Ensilages avec conservateur		$DT = 0,96DT_{Ensilage \text{ sans conservateur}}$		
Foins		$DT = 50,8 + 0,12MAT - 0,00018MAT^2 + \Delta_{Foin}$		
Valeurs de Δ		Δ_{FV}	$\Delta_{Ensilage}$	Δ_{Foin}
Graminées 1 ^{er} cycle		8,8	4,9	6,2
Graminées autres cycles		4,6	2,5	3,2
Légumineuses		6,8	4,2	5,0
Prairies permanentes 1 ^{er} cycle		4,4	2,5	1,9
Prairies permanentes autres cycles		0	0	0
Estimation des valeurs de dr				
$dr = 100 \times [1,11 \times (1 - DT/100) \times MAT - PANDI] / [1,11 \times (1 - DT/100) \times MAT]$				
Avec PANDI = 7,9 + 0,08 MAT - 0,00033MAT ² + Δ_1 + Δ_2 + Δ_3		N = 63	R ² = 0,50	ETR = 2,1
Avec $\Delta_1 = -1,9$ au 1 ^{er} cycle et 0 pour les autres cycles				
$\Delta_2 = -2,3$ pour graminées et prairies permanentes et 0 pour les légumineuses				
$\Delta_3 = -2,0$ pour les fourrages verts et 0 pour les fourrages conservés				

(1) : du fait de la prise en compte de la matière sèche de l'ensilage, ces équations s'appliquent pour tous les types d'ensilages (brins courts en coupe directe, préfanés et mi-fanés).

(2) : équations calculées sur les valeurs des tables.

et des légumineuses. La prise en compte d'un effet de l'espèce végétale n'améliore pas sensiblement la précision du modèle. Nous n'avons donc retenu que l'effet de la famille botanique, plus global et plus facilement utilisable. Enfin, à l'exception des légumineuses, la DT est plus élevée pour le premier cycle que pour les suivants. Cependant, au-delà du deuxième cycle, la DT ne varie pas en fonction du cycle d'exploitation. L'effet du cycle de végétation a donc été pris en compte uniquement en distinguant le premier cycle des suivants pour les graminées et les prairies permanentes.

b) Les fourrages conservés

Aussi bien pour les fourrages fermentés que pour les foins, nous avons pu établir des relations significatives entre la DT du fourrage conservé et celle du fourrage vert correspondant (tableau 5).

Pour les fourrages fermentés (ensilages directs, préfanés et fourrages mi-fanés enrubannés) la DT varie significativement avec la teneur en MS du fourrage. Ainsi, la DT d'un fourrage fermenté est d'autant plus faible que le fanage est poussé et que la teneur en N soluble diminue. 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 fourrages enrubannés (de 40 à 65 % MS), d'autre part. Cette équation a donc une portée générale, en précisant toutefois qu'elle a été établie sur des données correspondant à des ensilages correctement conservés. En effet, la teneur en N soluble des ensilages présents dans la base de données et pour lesquels ce critère était disponible, n'est supérieur à 60 % de la teneur en N total que dans deux cas.

Par ailleurs pour les ensilages directs et préfanés la présence d'un conserva-

teur efficace de type acide formique réduit la DT du fourrage en réduisant la quantité d'N soluble présent dans le fourrage. Les 16 comparaisons dont nous disposons entre des ensilages réalisés avec et sans conservateur à mêmes teneurs en MS et en MAT, nous ont permis de quantifier l'effet du conservateur. Ainsi, la DT des fourrages préparés avec conservateur représente 96 % de celle de l'ensilage préparé sans conservateur (tableau 5).

Pour les foins, l'équation que nous avons établie montre que la DT des foins varie dans le même sens que celle des fourrages verts, mais dans de plus faibles proportions, la pente de la relation étant de 0,68 (tableau 5). L'ajout d'une autre covariable (MAT, NDF) ou d'un effet de la famille botanique n'améliore pas l'équation de prévision.

Les valeurs de DT des fourrages conservés des tables ont été calculées à

partir de celles des fourrages verts correspondants. Ces équations doivent également être utilisées à des fins de prévision lorsque l'analyse fourragère est effectuée sur un échantillon de fourrage vert à la mise en silo. En complément, pour permettre la prévision de la DT des fourrages conservés lorsque l'analyse est réalisée sur un échantillon prélevé après récolte et conservation, nous avons ajusté sur les nouvelles valeurs de DT des fourrages des tables, des équations de prévision directes à partir des caractéristiques des fourrages conservés (tableau 5). Nous avons construit ces équations avec les mêmes variables explicatives (MAT, et pour les ensilages la teneur en MS) et les mêmes effets fixes que ceux utilisés pour les équations construites à partir des caractéristiques du fourrage vert. Lorsqu'on considère les pentes de ces équations (tableau 5), l'effet de la MAT est un peu moins fort pour les ensilages que pour les fourrages verts, mais de même ampleur pour les foin.

2.2 / Prévision de la *dr*

La quantité de MANDS est un indicateur relatif de la teneur en PANDI des aliments, mais elle peut ne pas refléter la valeur absolue des PANDI puisque le résultat expérimental est fonction de nombreux facteurs méthodologiques (conservation et broyage des échantillons, temps de séjour des sachets dans le rumen avant le passage dans l'intestin, présence ou non d'une attaque peptique, méthode de lavage lors de la récupération dans les déjections). Pour calculer le coefficient de proportionnalité entre MANDS et PANDI, nous avons procédé à l'analyse mathématique des 51 données parmi les 63 présentées ci-dessus pour lesquelles nous disposions des quantités totales de matières azotées apparemment non digestibles (MAND), retrouvées dans les fèces et mesurées sur moutons. Les quantités de MAND ont été fractionnées en une fraction alimentaire non digestible, une fraction microbienne (indexée sur la MOD en g/kg) et une fraction endogène (indexée sur la MOND en g/kg). La relation établie est :

$$\text{MAND} = 1,1 \text{ MANDS} + 0,033 \text{ MOD} + 0,058 \text{ MOND} \quad (n = 51 ; r = 0,48 ; \text{ETR} = 7,8)$$

Le coefficient de régression des MANDS n'étant statistiquement pas différent de 1 ($1,1 \pm 0,5$) nous avons assimilé les PANDI à la mesure des MANDS.

Nous avons ensuite établi, à partir des 63 données, une équation de prévision de la teneur en PANDI des fourra-

ges à partir de la teneur en MAT et d'effets fixes liés à la famille botanique, au cycle de végétation et au mode de conservation (tableau 5). Cette équation traduit le fait que, pour un type de fourrage donné, la quantité de PANDI est d'autant plus faible, et donc la *dr* est d'autant plus élevée, que le fourrage est riche en MAT. Toutefois l'effet de la MAT sur la *dr* est à pondérer de son effet sur la DT. Ainsi, pour le cas d'une repousse feuillue de graminées exploitée en vert dont la MAT varie entre 120 et 180 g/kg de MS, il s'ensuit une DT qui varie de 70,2 à 75,5, des PANDI qui varient de 8,4 à 7,3 g/kg de MS et une *dr* qui varie de 78,9 à 85,1. Les effets fixes introduits dans l'équation de prévision des PANDI traduisent qu'à même teneur en MAT, les PANDI sont plus faibles au premier cycle que pour les repousses, plus faibles pour les graminées et les prairies permanentes que pour les légumineuses et enfin plus faibles pour les fourrages verts comparés aux fourrages conservés.

3 / Les nouvelles valeurs de DT et de *dr* et les conséquences sur les valeurs PDI des fourrages

Le nouveau mode de calcul des valeurs de DT et de *dr* pour les prairies, les graminées et les légumineuses fourragères fait varier ces deux paramètres avec chaque fourrage selon sa teneur en MAT, son cycle d'exploitation et son mode de conservation. Il est donc nécessaire d'en préciser les plages de varia-

tion et les conséquences sur les valeurs en PDI. Nous indiquons ici les effets principaux et pour les illustrer nous utiliserons l'exemple du ray-grass anglais.

En préalable, il convient de rappeler que les valeurs PDI des fourrages des nouvelles Tables (Baumont *et al* 2007) ont été calculées avec les équations de base du système PDI, les paramètres relatifs à la synthèse et à la digestibilité des protéines microbiennes demeurant inchangés. La matière organique fermentescible (MOF = MOD - MA non dégradables - matières grasses - produits fermentaires) nécessaire au calcul des PDIE est estimée pour chaque fourrage à partir des caractéristiques données dans les Tables. Les teneurs en matières grasses et les valeurs de produits de fermentation des ensilages utilisées dans le calcul de la MOF sont celles qui sont données en annexe des Tables. Pour les fourrages pour lesquels les équations de prévision de la DT et de la *dr* ne s'appliquent pas, les valeurs PDI doivent être calculées à partir des valeurs de DT et de *dr* données au tableau 6.

3.1 / Valeurs de DT et de *dr*

La prise en compte de la teneur en MAT dans l'estimation de la DT permet dorénavant de rendre compte de la diminution de la dégradabilité de l'azote des fourrages lorsque le stade d'exploitation ou de récolte est plus tardif. Ainsi, les fourrages exploités à un stade feuillu auront une dégradabilité nettement supérieure à la valeur de 73 qui avait été retenue en 1988 pour tous les fourrages verts, et les fourrages exploités à des stades tardifs après l'épiaison, auront une dégradabilité plus faible. La

Tableau 6. Valeurs de DT et de *dr* (en %) retenues pour les autres fourrages.

Fourrages	DT	<i>dr</i>
Pailles, cannes et spathes	60	70
Ensilages		
Maïs plante entière	72	70
Cannes de maïs	78	60
Epis de maïs	55	90
Blé immature	72	70
Orge immature	72	70
Féverole avec conservateur	70	55
Pois avec conservateur	70	60
Tournesol sans conservateur	70	70
Choux sans conservateur	70	65
Betteraves, endives, navets	85	65
Carottes	85	60
Manioc	75	95
Pommes de terre	65	60
Rutabagas et topinambours	85	95
Pulpes de betteraves ensilées	60	65
Feuilles et collets de betteraves	75	70
Pulpes de pommes de terre	65	95

Figure 2. Variations de la DT avec la teneur en MAT du fourrage vert pour le ray-grass anglais exploité en vert au premier cycle de végétation et aux cycles suivants.

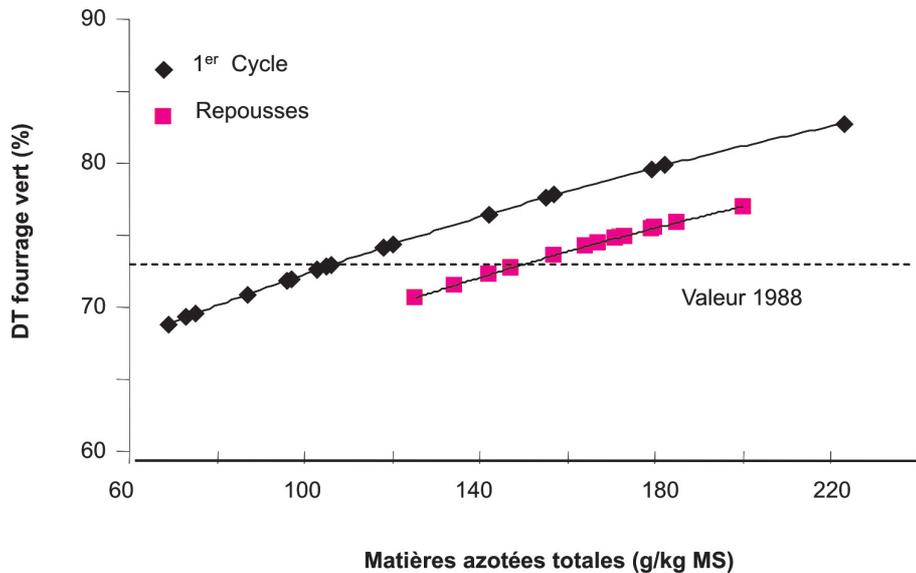


figure 2 illustre ces effets dans le cas du ray-grass anglais, la DT variant au premier cycle entre 69 et 83 et entre 71 et 77 aux cycles suivants. A même teneur en MAT, la DT d'une repousse sera inférieure de 4 points environ à celle du fourrage exploité au premier cycle de végétation.

Pour les fourrages conservés, les valeurs de DT sont globalement plus élevées que les valeurs qui avaient été fixées en 1988. L'augmentation est particulièrement nette pour les ensilages récoltés en coupe directe. Ainsi pour le ray-grass anglais (figure 3), la DT d'un ensilage récolté au premier cycle en coupe directe sera comprise entre 80 et 85 s'il est réalisé sans conservateur et entre 77 et 82 s'il est réalisé avec un conservateur, alors que les valeurs retenues en 1988 étaient respectivement de 78 et de 70. Les nouvelles estimations de la DT conduisent à rapprocher fortement les DT des ensilages réalisés en coupe directe avec un conservateur de celles des ensilages préfanés, qui sont dans l'exemple du ray-grass anglais récolté au premier cycle également comprises entre 77 et 82 (figure 3).

Les valeurs de DT des foin s'écartent moins de la valeur de 66 qui avait été retenue en 1988. Ainsi dans le cas du ray-grass anglais, la DT du foin varie entre 69 pour une récolte précoce au stade début épiaison et 74 pour une récolte tardive au stade floraison. Enfin, les estimations de DT pour les ensilages mi-fanés se situent à des valeurs intermédiaires entre celles attribuées aux ensilages préfanés et

aux foin correspondants, leurs DT variant entre 72 et 76 dans le cas du ray-grass anglais selon la teneur en MAT à la récolte (figure 3).

Les valeurs de *dr*, estimées maintenant à partir des matières azotées résiduelles mesurées par la technique des sachets mobiles, sont globalement supérieures, jusqu'à 15 points (voir tableau 7), à celles qui avaient été proposées en 1988. A l'intérieur d'un type donné de fourrages, par exemple les fourrages verts exploités au premier cycle, la *dr* varie avec la teneur en MAT du fourrage dans le même sens que la DT. Ainsi la *dr* d'un fourrage riche en MAT parce qu'exploité à un stade de végétation précoce sera plus élevée que celle du même fourrage exploité à un stade plus tardif. En

revanche, les effets du mode de conservation sur la *dr* sont opposés à ceux que l'on observe sur la DT. Ainsi pour le même fourrage, la *dr* est plus élevée s'il est récolté en foin qu'en ensilage, et la *dr* augmente avec le degré de fanage au sein des différents types d'ensilage. Cela est illustré dans le tableau 7 pour le ray-grass anglais exploité au premier cycle. Les nouvelles valeurs de *dr* sont supérieures à celles qui avaient été retenues en 1988, mais la hiérarchie entre les différents modes de conservation n'est pas modifiée.

3.2 / Conséquences sur les valeurs PDI de l'herbe

Les nouvelles estimations des valeurs de DT et de *dr* des fourrages modifient essentiellement les valeurs PDIA et par conséquent les valeurs PDIE puisque l'impact sur les valeurs PDIME est faible. En revanche, les valeurs PDIMN et PDIA évoluant en sens contraire, les valeurs PDIN des fourrages ne sont quasiment pas modifiées.

Par rapport aux valeurs proposées en 1988, les variations des valeurs PDIE traduisent la relation inverse entre la dégradabilité de l'azote d'un fourrage et sa valeur PDIE. Ainsi, la valeur PDIE des graminées et des légumineuses exploitées à des stades de végétation précoces diminue en proportion de l'augmentation de leur dégradabilité. Pour les graminées, la valeur des repousses augmente légèrement, de 3 g de PDIE par kg MS en moyenne, du fait de la diminution de leur dégradabilité. Les variations de la valeur PDIE des graminées en vert sont illustrées à la figure 4 en prenant l'exemple du ray-grass anglais, l'ampleur de la diminution de la valeur PDIE des grami-

Figure 3. Variations de la DT avec la teneur en MAT du fourrage conservé pour le ray-grass anglais exploité au premier cycle de végétation selon qu'il est récolté en ensilage ou en foin.

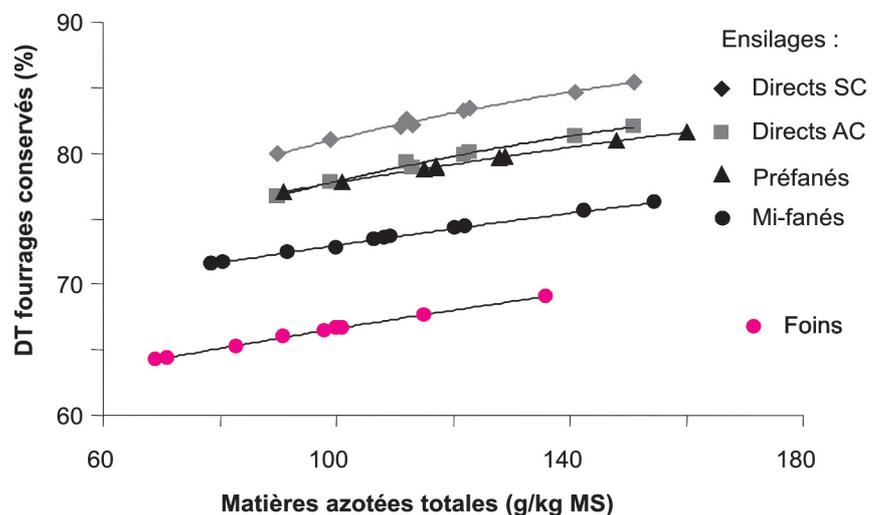


Tableau 7. Plage de variation des valeurs de *dr* (en %) pour le ray-grass anglais récolté au premier cycle de végétation par rapport aux valeurs retenues en 1988 pour l'ensemble des graminées.

	Valeur de <i>dr</i> retenue pour les graminées (Tables 1988)	Plage de variation pour le ray-grass anglais au 1 ^{er} cycle (Tables 2007)
Fourrage vert	75	76 - 87
Ensilages :		
Coupe directe sans conservateur	60	59 - 66
Coupe directe avec conservateur	65	65 - 73
Préfanés	60	64 - 75
Mi-fanés	/	68 - 80
Foins	70	72 - 82

Figure 4. Nouvelles estimations de la valeur PDIE (PDIE 2007) par rapport aux valeurs de 1988 pour le ray-grass anglais exploité en vert.

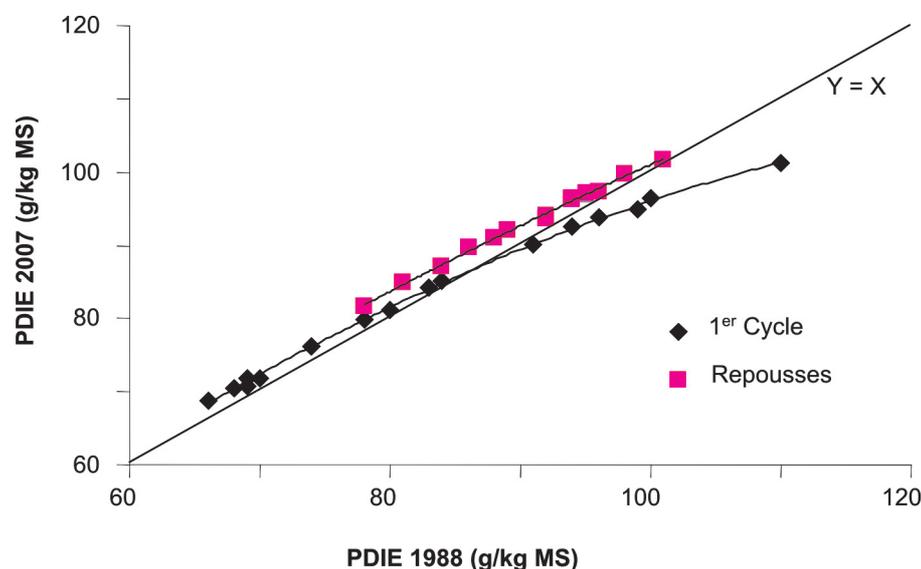
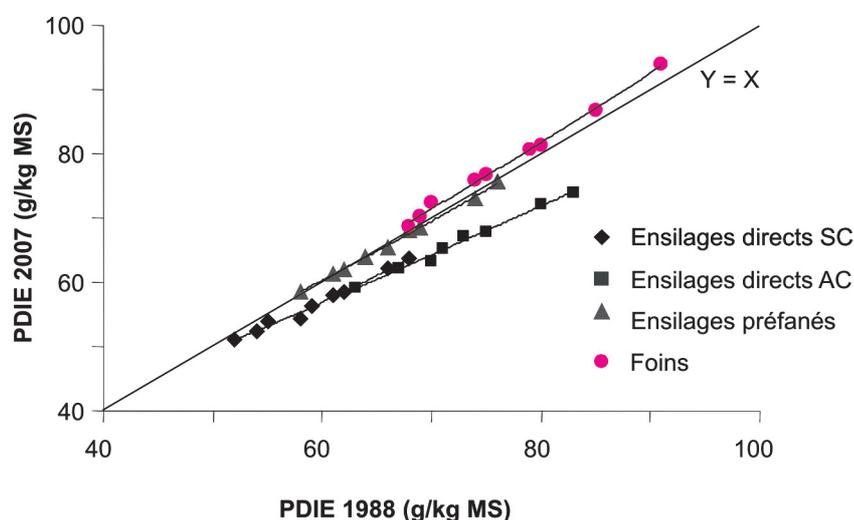


Figure 5. Nouvelles estimations de la valeur PDIE (PDIE 2007) par rapport aux valeurs de 1988 pour le ray-grass anglais exploité au premier cycle de végétation et récolté selon les différents modes de conservation.



nées exploitées à des stades de végétation précoces pouvant atteindre 10 g de PDIE. En revanche, cette diminution de la valeur PDIE n'apparaît pas pour les prairies permanentes du fait de la moindre dégradabilité de l'azote des ces fourrages par rapport aux espèces pures de graminées.

Pour les fourrages conservés, les nouvelles estimations des valeurs PDI conduisent à une augmentation de la valeur PDIE des foins qui est de l'ordre de 2 à 3 g/kg MS pour les premiers cycles de graminées, de l'ordre de 4 à 6 g/kg de MS pour les repousses et de l'ordre de 5 à 10 g/kg de MS dans le cas des prairies permanentes. En revanche, les valeurs PDIE des ensilages d'herbe réalisés en coupe directe sont sensiblement diminuées, de 4 à 10 g/kg MS pour les ensilages avec conservateur. Ces diminutions sont plus importantes pour les fourrages de valeur PDI élevées (figure 5), c'est-à-dire les fourrages récoltés les plus précocement, et pour les espèces pures de graminées que pour les prairies permanentes. Cette diminution de la valeur des ensilages d'herbe réalisés en coupe directe est cohérente avec les observations de performances animales qui tendaient à montrer que les valeurs PDI des fourrages proposées en 1988 étaient vraisemblablement surestimées. Les valeurs des ensilages préfanés, quant à elles, ne varient presque pas.

Enfin pour donner un repère, un calcul de rationnement fait pour une vache laitière en milieu de lactation produisant 30 kg de lait, alimentée avec de l'ensilage d'herbe complété par de l'orge et du tourteau de soja indique qu'une diminution de la valeur de l'ensilage d'herbe de 8 g de PDIE par kg de MS conduit à une augmentation de la quantité de tourteau dans la ration de 0,7 kg de MS, sans que la quantité totale d'aliment concentré soit modifiée.

Conclusion

La constitution et l'analyse de bases de données regroupant les mesures de dégradabilité de l'azote dans le rumen et de digestibilité des protéines des fourrages dans l'intestin nous a permis de proposer de nouvelles estimations des valeurs de DT et de *dr* pour les fourrages issus des prairies permanentes, des graminées et des légumineuses fourragères.

Les valeurs estimées de DT et de *dr* pour ces fourrages dépendent maintenant de leur teneur en MAT, qui traduit les effets du stade de végétation auquel le fourrage est exploité, et du niveau de fertilisation azotée. Les effets de la famille botanique et du cycle de végétation sont pris en compte dans les équations de prévision de la DT et de la *dr*. Les effets des différents modes de conservation de l'herbe sur la DT et la *dr* sont également dorénavant mieux pris en compte, en particulier en tenant compte de l'effet de la teneur en MS de l'ensilage sur la DT.

Ces équations de prévision, basées sur un nombre conséquent de données expérimentales, ont une précision satisfaisante. Leur utilisation pour recalculer les valeurs PDI des fourrages dans les Tables INRA 2007 de la valeur des fourrages a permis, d'une part de conforter ces valeurs, et d'autre part de les affiner. Par rapport aux valeurs des Tables précédentes, les principales modifications portent sur les valeurs PDIE de certaines catégories de fourrages avec une augmentation de la valeur des foin, une diminution de la valeur des ensilages d'herbe, les variations étant comprises entre 2 et 10 g de PDIE par kg de MS selon les types de fourrages.

Pour les démarches de prévision de la valeur PDI à partir d'une analyse fourragère, les nouvelles équations doivent être utilisées. Elles ne nécessitent que l'analyse de la teneur en MAT du fourrage et permettent d'obtenir des valeurs PDI calculées en cohérence avec les Tables INRA 2007.

Remerciements

Nous remercions J. Murphy (Teagasc) et R. Daccord (Posieux, Suisse) pour les données qu'ils ont bien voulu nous communiquer.

Références

- Amrane R., Michalet-Doreau B., 1993. Effect of maturity of Italian rye grass and lucerne on ruminal nitrogen degradability. *Ann. Zootech.*, 42, 31-37.
- Andrieu J., Demarquilly C., Sauvant D., 1988. Tables de la valeur nutritive des aliments. In : Jarrige R. (Ed.), Alimentation des bovins, ovins et caprins. INRA Éditions, Paris, France, 351-464.
- Antoniewicz A.M., Kowalczyk J., Kanski J., Gorska-Matusiak Z., Nalepka M., 1995. Rumen degradability of crude protein of dried grass and lucerne forage measured by *in sacco* incubation and predicted by near infrared spectroscopy. *Anim. Fd Sci. Technol.*, 72, 203-216.
- Aufrère J., Graviou D., Baumont R., Detour A., Demarquilly C., 2000. Degradation in the rumen of proteins from fresh lucerne forage in various stages of growth and conserved as silage or hay. *Ann. Zootech.*, 49, 461-474.
- Baumont R., Dulphy J.P., Sauvant D., Meschy F., Aufrère J., Peyraud J.L., 2007. Valeur alimentaire des fourrages et des matières premières : tables et prévision. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux. Valeurs des Aliments. Tables INRA 2007. Éditions Quæ, 149-179.
- Beever D.E., Dhanoa M.S., Losada H.R., Evans R.T., Cammell S.B., France J., 1986. The effect of forage species of harvest on the process of digestion occurring in the rumen of cattle. *Br. J. Nutr.*, 56, 439-454.
- Cone J.W., van Gelder A.H., Mathijssen-Kamman A.A., Hindle V.A., 2004. Rumen escape protein in grass and grass silage determined with a nylon bag and an enzymatic technique. *Anim. Fd Sci. Technol.*, 111, 1-8.
- Dulphy J.P., Demarquilly C., Baumont R., Jailler M., L'Hotelier L., Dragomir C., 1999. Study of modes of preparation of fresh and conserved forage samples for measurement of their dry matter and nitrogen degradations in the rumen. *Ann. Zootech.*, 48, 275-288.
- Gonzalez J., Faria-Marmol J., Rodriguez C.A., Alvir M.R., 2001. Effects of stage of harvest on the protein value of fresh lucerne for ruminants. *Reprod. Nutr. Dev.*, 41, 381-392.
- Le Goffe P., 1991. Méthodes d'étude et facteurs de variation de la dégradabilité de l'azote des fourrages verts dans le rumen. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 82p.
- Le Goffe P., Vérité R., Peyraud J.L., 1993a. Influence de l'espèce et de la saison sur la dégradabilité de l'azote des fourrages verts dans le rumen. *Ann. Zootech.*, 42, 3-16.
- Le Goffe P., Vérité R., Faverdin P., 1993b. Facteurs de variation et prédiction de la dégradabilité de l'azote des fourrages verts dans le rumen. *Ann. Zootech.*, 42, 17-30.
- Michalet Doreau B., Ould-Bah M.Y., 1992. Influence of hay making on *in situ* nitrogen degradability of forages in cows. *J. Dairy Sci.*, 75, 782-788.
- Michalet-Doreau B., Vérité R., Chapoutot P., 1987. Méthodologie de mesure de la dégradabilité *in sacco* de l'azote des aliments dans le rumen. *Bull. Tech. CRZV Theix*, 69, 5-7.
- Nozières M.O., Dulphy J.P., Peyraud J.L., Poncet C., Baumont R., 2005. Estimation de la dégradabilité de l'azote (DT) des fourrages dans le rumen et de la digestibilité réelle des protéines alimentaires dans l'intestin grêle (*dr*) : conséquences sur la valeur PDI des fourrages. *Renc. Rech. Rum.*, 12, 105-108.
- Ould-Bah M.Y., 1989. Adaptation de la technique *in sacco* à l'étude de la dégradation dans le rumen de l'azote des fourrages et application à l'étude des fourrages verts et conservés. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, 186p.
- Peyraud J.L., Astigarraga L., 1998. Review of the effect of fertilization on the chemical composition, intake, digestion and nutritive value of fresh herbage: consequences on animal nutrition and N balance. *Anim. Fd Sci. Technol.*, 72, 235-259.
- Peyraud J.L., Genest-Rulquin C., Vérité R., 1988a. Mesure de la digestion de l'azote des aliments dans l'intestin des ruminants par la technique des sachets mobiles. 1. Evaluation de la quantité de matières azotées indigestibles en sachet des principaux aliments. *Reprod. Nutr. Dév.*, 28, suppl 1, 129-130.
- Peyraud J.L., Genest-Rulquin C., Vérité R., 1988b. Mesure de la digestion de l'azote des aliments dans l'intestin des ruminants par la technique des sachets mobiles. 2. Comparaison de différents critères de la teneur en azote réellement non digestible. *Reprod. Nutr. Dév.*, 28, suppl 1, 131-132.
- Sauvant D., Schmidely P., Daudin J.J., 2005. Les méta-analyses de données expérimentales : application en nutrition animale. *INRA Prod. Anim.*, 18, 63-73.
- Valk H., Kappers I.E., Tamminga S., 1996. *In sacco* degradation characteristics of organic matter, neutral detergent fibre and crude protein of fresh grass fertilized with different amounts of Nitrogen. *Anim. Fd Sci. Technol.*, 63, 63-87.
- Van Vuuren A.M., Tamminga S., Ketelaar R.S., 1991. *In sacco* degradation of organic matter and crude protein of fresh grass in the rumen of grazing dairy cows. *J. Agric. Sci.*, 116, 429-436.
- Van Vuuren A.M., Krol-Kramer F., Van Der Lee R.A., Corbijn H., 1992. Protein digestion and intestinal amino acids in dairy cows fed fresh lolium perenne with different nitrogen contents. *J. Dairy Sci.*, 75, 2215-2225.
- Verbic J., Babnik, D., 1996. The effect of hay-making procedures on the ruminal protein degradability of hay. *Kmiva*, 38, Zagreb 5, 269-277.
- Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C., 1987. Révision du système des protéines digestibles dans l'intestin. *Bull. Tech. CRZV Theix*, 70, 19-34.
- Waters C.J., Givens D.I., 1992. Nitrogen degradability of fresh herbage: effect of maturity and growth type, and prediction from chemical composition and by near infrared reflectance spectroscopy. *Anim. Fd Sci. Technol.*, 38, 335-349.

Résumé

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 de végétation. Nous présentons ici les méthodes d'estimation de la DT et de la *dr* pour les fourrages de prairies permanentes, de graminées et de légumineuses fourragères, qui ont été intégrées dans le calcul des valeurs PDI des Tables INRA 2007 de la valeur des fourrages.

Pour les fourrages verts, nous avons rassemblé 375 mesures de DT (75,3 % en moyenne). L'analyse de cette base de données permet de prévoir les variations de la DT ($r^2 = 0,87$ et $etr = 3,5$) 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 fourrages verts - foin et 48 couples fourrages verts - 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 fourrages enrubannés 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.

Ces nouvelles méthodes d'estimation permettent de moduler, à travers l'effet de la teneur en MAT, les valeurs de DT et de *dr* selon le stade de végétation auquel le fourrage est exploité et selon le niveau de fertilisation azotée. Les effets de la famille botanique, du cycle de végétation et des différents modes de conservation de l'herbe sont également mieux pris en compte. Les nouvelles valeurs PDI des tables sont ainsi confortées. Les modifications induites par l'utilisation de ces nouvelles estimations de DT et *dr* portent principalement sur les valeurs PDIE qui diminuent pour les fourrages exploités au premier cycle à des stades de végétation précoces et qui augmentent légèrement pour les repousses. Pour les fourrages conservés, les valeurs PDIE des foin sont légèrement augmentées et celles des ensilages réalisés en coupe directe sont diminuées. Les valeurs des ensilages préfanés demeurent inchangées.

Abstract

Forage protein value. New estimation of the rumen protein degradability and of the true digestibility of dietary protein in the small intestine, and consequences on the PDI values.

The PDI system expresses the protein value of ruminant feeds in digestible proteins entering the small intestine. 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, the DT values for forages was set to 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 a botanical family, plant species, growth cycle and level of nitrogen fertilisation, and decreases with plant maturity stage. We present the new estimation methods of DT and *dr* for natural grasslands, grasses and legume forages. The new estimations of DT and *dr* were integrated in the calculations of the forage PDI values in the renewed INRA 2007 feed value tables.

To improve DT estimation, a database of 375 measurements for fresh forages was built. From the analysis of the database using a mixed model to take into account laboratory effects, DT can be predicted from the CP content of the forage, with a quadratic effect, and from a botanical family and vegetation cycle effects ($r^2 = 0.87$; $RSD = 3.5$). Furthermore, DT values of conserved herbage can be predicted from the corresponding DT values of fresh herbage for hays ($n = 29$; $r^2 = 0.71$; $RSD = 3.6$), as well as 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 are calculated from the dietary proteins entering the intestine ($1.11 \times CP \times (1-DT)$) and from the truly indigestible dietary protein (IDN). We predict IDN from forage characteristics (CP, botanical family, vegetation cycle) using an equation calculated on data of mobile intestinal nylon bags ($n=63$; $r^2=0.50$; $RSD=2.1$).

Estimating DT and *dr* values from forage CP contents allow taking better into account, the effects of plant maturity stage and level of nitrogen fertilisation on herbage protein values. The effects of botanical family, vegetation cycle and the different conservation techniques are also better taken into account. Thus, the consistency of forage PDI values in the INRA 2007 tables is improved. The most important modifications induced by the new estimations of forage DT and *dr* concern the PDIE values that decrease for forages used at early vegetation stages during the first growth cycle, and that slightly increase for the re-growth cycles. For conserved forages, PDIE values of hays slightly increase, and those of direct cut silages decrease, whereas the values of wilted silages remain unchanged.

NOZIERES M.-O., DULPHY J.-P., PEYRAUD J.-L., PONCET C., BAUMONT R., 2007. La valeur azotée des fourrages. Nouvelles estimations de la dégradabilité des protéines dans le rumen et de la digestibilité réelle des protéines alimentaires dans l'intestin grêle : conséquences sur les valeurs PDI. INRA Prod. Anim., 20, 109-118.

