

## Explication et prévision des cinétiques de dégradation en Rusitec des matières azotées végétales à partir d'un fractionnement des parois

G Blanchart, B Vignon

INRA, Laboratoire de la chaire de zootechnie de l'ENSAIA, 2 avenue de la Forêt-de-Haye,  
54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

(Reçu le 24 octobre 1989; accepté le 25 avril 1990)

**Résumé** — Les relations entre la solubilité de l'azote dans les détergents de Van Soest et la dégradation de l'azote *in vitro* ont été étudiées sur 11 aliments à partir de mesures de dégradabilité en rumen artificiel à flux semi-continu de type Rusitec. Les cinétiques de disparition de l'azote en Rusitec, et spécialement les taux de disparition maximale, sont assez proches des valeurs calculées à partir des données de la bibliographie obtenues *in situ* par la méthode des sachets. Dans le modèle exponentiel, utilisé pour décrire la dégradation de l'azote, la dégradation maximale ( $a+b$ ) est corrélée négativement à la proportion de l'azote insoluble dans le détergent acide de Van Soest (ADIN/N total). Pour les aliments testés, la fraction indégradable correspond à une quantité équivalente à environ 76% de la fraction ADIN. La dégradation instantanée ( $a$ ) est, pour sa part, mieux expliquée par la proportion d'azote insoluble dans le détergent neutre de Van Soest (NDIN/N total) que par la solubilité de l'azote dans une solution saline. La vitesse de disparition ( $c$ ) de la fraction lentement dégradable est inversement liée à la proportion de la fraction ADF dans les parois totales (NDF), qui témoigne de leur résistance à la dégradation. Ce type de fractionnement pourrait être utilisé pour prévoir la valeur azotée des aliments pour ruminants.

**dégradation / azote / Rusitec / rumen / détergent**

**Summary** — Utilization of a cell wall fractionation to explain and predict the kinetics of plant protein degradation in the rumen (Rusitec). The relation between nitrogen solubility in Van Soest detergents and *in vitro* nitrogen degradation was studied on 11 substrates with degradation process calculations in digestive trials and an artificial semi-continuous flow (Rusitec) rumen. The kinetics of plant protein degradation in Rusitec, especially the maximum degradation values, were rather similar to those calculated from literature data obtained *in situ*. In the exponential model used to describe the protein degradation, the maximum disappearance ( $a + b$ ) was negatively correlated with the percentage of acid detergent insoluble nitrogen in the Van Soest (ADIN/Total N). In the foods tested, the non degradable fraction corresponds to a quantity which is equivalent to  $\approx 76\%$  of the ADIN fraction. The instantaneously degraded nitrogen ( $a$ ) was rather well explained by the percentage of neutral detergent insoluble nitrogen in the Van Soest (NDIN/Total N). The rate of disappearance ( $c$ ) of the slowly degraded fraction was inversely correlated with the proportion of ADF in the NDF, which demonstrates the latter's resistance to degradation. This type of fractionation could be used in predicting nitrogenous value of feed stuffs for ruminants.

**degradation / nitrogen / Rusitec / rumen / detergent**

## INTRODUCTION

La caractérisation de la valeur azotée des aliments prend le plus souvent en compte la notion de dégradabilité de l'azote et parfois, comme dans le système des PDI, celle de dégradation théorique, combinaison de la cinétique de dégradation et du temps de séjour dans le rumen (Jarrige, 1988).

La dégradation de l'azote dans le rumen est fonction de 3 catégories de paramètres :

- la dégradabilité de l'azote;
- les activités des micro-organismes du rumen, qui caractérisent leur potentiel de dégradation des substrats alimentaires;
- la durée pendant laquelle les matières azotées sont soumises aux activités des micro-organismes, c'est-à-dire leur temps de séjour dans le rumen.

La dégradabilité de l'azote est une caractéristique des aliments. Elle dépend, dans une large mesure, de la nature des matières azotées, qui détermine leurs propriétés physico-chimiques. À ce titre, la solubilité des protéines est l'un des principaux facteurs déterminant leur dégradabilité (Nocek *et al*, 1983; Cotta et Hespell, 1986). L'abondance des liaisons disulfures, qui peuvent assurer le maintien de la structure de la protéine, constitue cependant un frein aux activités enzymatiques (Mahadevan *et al*, 1980; Nugent *et al*, 1983). Enfin, certaines fractions de la matière organique peuvent protéger les protéines végétales des attaques microbiennes : les fractions hémicellulosique et cellulosique (Ørskov, 1982), les tannins (Zelter *et al*, 1970; Driedger et Hatfield, 1972) et la lignine (Hartnell et Satter, 1978; Thomas *et al*, 1979) sont celles qui ont été le plus étudiées. Les effets de l'ensemble de ces facteurs pourraient être évalués par la résistance à la solubilisation

dans les détergents de Van Soest (Van Soest et Wine, 1967). Krishnamoorthy *et al* (1982a et b) ont ainsi considéré la fraction azotée insoluble dans le détergent neutre comme une estimation de la fraction lentement dégradable, et la fraction insoluble dans le détergent acide comme complètement inutilisable.

Les essais rapportés ici ont comme objectif de caractériser les relations existant entre la composition chimique des aliments, et spécialement leur composition azotée, et la dégradabilité de l'azote. Ces relations pourraient être utilisées pour proposer une technique de laboratoire simple pour prévoir la dégradabilité de l'azote dans le rumen.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'appareil utilisé est un fermenteur artificiel à flux semi-continu du type du Rusitec proposé par Czerkawski et Breckenridge en 1977 et adapté par Blanchart et Vignon (1984), qui permet de travailler sur des quantités de produits (aliments, résidus de fermentation et contenus liquides) 2,5 fois plus importantes que dans le modèle original.

Les sachets destinés à recevoir les échantillons d'aliment sont fabriqués par thermosoudure en tissu de nylon de porosité 50 µm. Leurs dimensions (15 x 9 cm) et la quantité d'aliment qui y est placée (14 g de matière sèche) établit le rapport «quantité de matière sèche/surface d'échange» à environ 52 mg/cm<sup>2</sup>. Cette valeur est plus élevée que celles rapportées le plus souvent dans la bibliographie pour la méthode des sachets, mais proche de celle habituellement proposée pour l'utilisation du Rusitec (Blanchart *et al*, 1989).

La mise en route du fermenteur est effectuée en introduisant dans chaque réacteur un inoculum liquide constitué de 1,25 l de jus de rumen et 1,25 l d'un mélange de solution saline (tableau I) et d'eau (60/40). Le jus de rumen est obtenu à partir de contenu total de rumen qui est prélevé sur au moins 3 moutons munis d'une canule permanente du rumen. Les moutons reçoivent une ration quotidienne constituée de

**Tableau I.** Composition de la solution saline.

Macro-éléments (g/l)		Oligo-éléments (mg/l)	
NaHCO <sub>3</sub>	9,240	FeSO <sub>4</sub> , 7 H <sub>2</sub> O	75,00
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> , 12 H <sub>2</sub> O	7,125	MnSO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O	4,00
NaCl	0,470	CoCl <sub>2</sub> , 6 H <sub>2</sub> O	3,54
KCl	0,450	CuSO <sub>4</sub> , 5 H <sub>2</sub> O	2,00
MgCl <sub>2</sub> , 6 H <sub>2</sub> O	0,100	ZnSO <sub>4</sub> , 7 H <sub>2</sub> O	0,10
CaCl <sub>2</sub> , 2 H <sub>2</sub> O	0,073		
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,068		

500 g de luzerne déshydratée et de foin de prairie permanente à volonté (ingestion approximative : 600 g/j). Ce contenu de rumen est pressé à travers 3 couches de gaze, au plus tard 30 min après le prélèvement, juste avant le remplissage des réacteurs.

Les aliments (tableau II) sont utilisés, dans la mesure du possible, sans traitement préalable. Les aliments déshydratés sont utilisés en l'état. Les aliments secs non moulus sont broyés à 1,7 mm. Les aliments humides sont lyophilisés puis broyés à 1,7 mm.

**Tableau II.** Composition chimique des aliments.

Aliments	Composition de la matière sèche (%)			Fractions azotées				
	N <sub>T</sub> x 6,25	NDF	ADF	en % de N <sub>T</sub>			en %	
				N <sub>S</sub>	NDIN	ADIN	N <sub>S</sub>	ADIN
							NDSN	NDIN
Tourteau de soja	51,5	21,3	12,5	6,2	15,4	1,8	7,3	11,7
Tourteau de colza	36,1	27,4	18,2	15,4	30,5	6,2	22,2	20,3
Tourteau de tournesol	34,9	43,7	31,6	25,1	9,1	4,0	27,6	44,0
Graine de lupin	33,8	35,2	20,1	29,8	10,5	1,3	30,7	12,2
Son de blé	16,9	66,0	14,8	27,5	45,5	3,2	50,5	7,0
Luzerne déshydratée 1	20,8	44,5	27,5	25,5	51,2	11,6	52,3	22,7
Luzerne déshydratée 2	16,7	51,8	32,2	13,9	44,3	9,2	23,7	20,8
Foin de luzerne	18,8	48,4	36,5	26,5	22,6	15,1	34,2	66,8
Ensilage de maïs	8,0	41,6	24,0	50,0	28,7	10,0	70,1	34,8
Maïs déshydraté	9,0	55,6	24,7	14,6	40,3	17,4	24,4	43,2
Résidu de pressage de raisin	15,0	66,7	55,8	5,2	69,8	43,2	17,2	61,9

N<sub>T</sub> : Azote total; NDF : *Neutral detergent fiber*, estimation des parois totales; ADF : *Acid detergent fiber*, estimation de la lignocellulose; N<sub>S</sub> : Azote soluble dans une solution saline; NDSN : Azote soluble dans le détergent neutre de Van Soest; NDIN : Azote insoluble dans le détergent neutre de Van Soest; ADIN : Azote insoluble dans le détergent acide de Van Soest.

Dès la mise en route du fermenteur, la solution saline est infusée en continu à raison de 1 500 ml/j. Le réglage du niveau de liquide dans les réacteurs déterminant un volume utile de 2 500 ml, ce débit correspond à un taux de renouvellement de la phase liquide de 0,6/j.

En fonctionnement habituel, 4 sachets contenant l'aliment à tester sont présents dans chaque réacteur. Ces sachets sont remplacés par paire tous les jours. Le temps de séjour normal d'un sachet est donc de 48 h.

Dans l'étude de la cinétique de dégradation, les sachets devant séjourner moins de 48 h (2, 4, 8, 12 et 24 h) dans le réacteur sont retirés après la durée de fermentation désirée. Ils sont remplacés par des sachets neufs qui entrent dans le cycle de routine. Si ce protocole se renouvelait à une fréquence trop élevée il risquerait de provoquer une augmentation progressive de la concentration en produits terminaux dans le milieu de fermentation, consécutivement à l'accroissement de la quantité d'aliment mise à fermenter chaque jour. Pour pallier cet inconvénient, le rythme de routine est repris pendant au moins 2 jours entre 2 mesures. La veille de chaque mesure, un contrôle des conditions de milieu dans les réacteurs est pratiqué de manière à vérifier que ces conditions sont semblables à celles observées en routine.

Pour chaque calcul de disparition, du contenu de réacteur est prélevé en début et en fin de période. Ces échantillons sont utilisés pour le dosage de l'azote ammoniacal par potentiométrie.

Deux réacteurs sont employés pour chaque aliment et le nombre de répétitions pour chaque durée est fixé de telle manière que la quantité de résidu, obtenue après regroupement, soit suffisante pour permettre l'analyse (2 à 10 sachets par réacteur).

À leur sortie des réacteurs, les sachets sont rincés 2 fois avec une solution saline à 40 °C. Le liquide de rinçage est réintroduit dans le réacteur de manière à faciliter le maintien de la population microbienne par un réensemencement journalier. Les sachets sont ensuite lavés en machine à l'eau courante froide en 2 cycles de lavage de 6 min. À l'issue de ce lavage, l'eau exprimée des sachets doit être parfaitement limpide et incolore. Les sachets subissent alors un préséchage d'au moins 10 h à température ambiante (de manière à éliminer la plus grande partie de l'eau résiduelle) avant d'être complète-

ment séchés 24 h à 80 °C. Cette pratique permet de réduire les effets du chauffage sur la composition chimique des résidus.

Les aliments et les résidus de fermentation sont analysés afin de permettre le calcul, pour chacun des aliments et chacune des durées de fermentation, des quantités disparues de matière sèche, de matière organique, de fraction NDF (Van Soest et Wine, 1967) d'azote total et d'azote insoluble dans le détergent neutre de Van Soest (NDIN). Sur les aliments sont également mesurées les teneurs en ADF (Van Soest, 1963) et en azote insoluble dans le détergent acide de Van Soest (ADIN).

Pour chaque aliment et chaque composant, l'équation de la cinétique de dégradation est calculée à l'aide de la procédure de régression non linéaire NLIN (SAS, 1987) ou, à défaut, par régression linéaire.

## RÉSULTATS

La cinétique de dégradation de 11 aliments a été étudiée (tableau III). Les durées de 4, 12, 24 et 48 h ont été systématiquement retenues. Pour améliorer la description de la cinétique de dégradation, les durées de 2 h (4 aliments) et de 8 h (5 aliments) ont été incluses dans l'étude, dans la mesure des possibilités.

D'une manière générale, la matière sèche et ses constituants disparaissent de moins en moins vite avec la durée de fermentation. Entre 24 et 48 h de fermentation, la disparition varie peu et les écarts rapportés à la différence de durée (24 h), correspondant aux vitesses de disparition au cours de cette période, deviennent très faibles (0,1 à 0,5%/h pour la matière sèche).

Quelle que soit la durée d'incubation, la disparition de la matière sèche est légèrement supérieure à celle de la matière organique. La fraction NDF présente des taux de disparition nettement inférieurs. La disparition de l'azote total est, en revanche, plus forte que celle de la matière organi-

**Tableau III.** Évolution en fonction du temps de séjour en Rusitec de la disparition des principaux composants des aliments.

(a) matière sèche

Aliment	Disparition (D)						D = a + b (1 - e <sup>-ct</sup> )			D = at + b	
	2	4	8	12	24	48	a	b	c	a	b
Tourteau de soja	ND	47,0	ND	73,8	82,5	95,1	28,8	65,8	8,5		
Tourteau de colza	48,6	52,2	62,5	65,0	75,2	81,3	43,2	39,0	7,3		
Tourteau de tournesol	ND	50,4	ND	63,2	69,2	71,5	38,2	33,4	11,4		
Graine de lupin	56,0	59,1	62,1	72,4	89,7	97,0	49,2	54,8	4,6		
Son de blé	ND	42,7	ND	58,4	68,2	71,2	28,3	43,4	10,0		
Luzerne déshydratée 1	ND	48,9	55,5	64,8	75,8	81,7	35,9	47,3	7,5		
Luzerne déshydratée 2	39,2	42,9	46,7	50,1	63,8	72,4	35,9	44,6	3,7		
Foin de luzerne	ND	35,6	ND	48,6	51,0	61,4	30,6	32,7	5,1		
Ensilage de maïs	ND	54,3	ND	55,4	56,6	62,0				0,18	53,2
Maïs deshydraté	45,6	49,6	50,2	51,4	52,9	57,7	46,3	13,5	3,5		
Résidu de pressage	ND	19,8	ND	20,7	23,0	30,9				0,26	17,9

(b) Matière organique

Aliment	Disparition (D)						D = a + b (1 - e <sup>-ct</sup> )			D = at + b	
	2	4	8	12	24	48	a	b	c	a	b
Tourteau de soja	ND	44,7	ND	72,3	81,5	94,9	26,4	68,2	8,3		
Tourteau de colza	48,4	51,8	62,1	64,3	74,8	81,1	43,2	39,1	7,0		
Tourteau de tournesol	ND	48,1	ND	60,9	67,1	69,5	36,0	33,5	11,2		
Graine de lupin	55,3	58,3	61,3	71,9	89,5	97,1	48,4	56,1	4,6		
Son de blé	ND	41,1	ND	55,7	66,3	69,4	27,9	42,3	9,2		
Luzerne déshydratée 1	ND	45,9	52,9	62,6	74,0	80,5	32,5	49,7	7,4		
Luzerne déshydratée 2	35,1	39,1	43,6	47,4	61,2	70,8	31,7	47,2	3,8		
Foin de luzerne	ND	45,0	ND	58,8	60,4	69,0	37,9	30,7	7,5		
Ensilage de maïs	ND	60,8	ND	66,2	73,2	73,9	55,1	19,8	8,0		
Maïs deshydraté	45,0	48,0	48,4	51,5	51,4	56,3	45,1	12,4	4,2		
Résidu de pressage	ND	19,1	ND	20,3	22,3	30,6				0,27	17,2

que. L'azote insoluble dans le détergent neutre disparaît généralement plus que l'ensemble de la fraction NDF.

La cinétique de teneur en ammoniac du milieu de fermentation est présentée dans le tableau IV. La concentration de base, évaluée par la teneur mesurée au temps 0

(c'est-à-dire immédiatement après le renouvellement des sachets), est généralement supérieure à 5 mg/100 ml, valeur souvent considérée comme seuil pour une activité microbienne normale. Seuls des aliments pauvres en azote (maïs deshydraté ou ensilé) ou dont l'azote est très fai-

## (c) Fraction NDF

Aliment	Disparition (D)						D = a + b (1 - e <sup>-ct</sup> )			D = at + b	
	2	4	8	12	24	48	a	b	c	a	b
Tourteau de soja	ND	12,6	ND	44,3	70,0	86,2	-11,1	101,6	6,6		
Tourteau de colza	1,6	7,5	14,8	21,3	37,4	47,8	- 3,8	56,8	5,1		
Tourteau de tournesol	ND	8,6	ND	25,2	33,5	37,0	- 6,6	43,7	10,7		
Graine de lupin	23,4	33,3	40,7	43,7	76,9	93,0	17,4	93,3	3,6		
Son de blé	ND	27,6	ND	43,2	53,6	58,2	14,5	44,5	8,7		
Luzerne déshydratée 1	ND	26,6	24,8	36,6	54,8	65,0	13,7	61,4	4,0		
Luzerne déshydratée 2	14,5	17,9	19,7	24,3	40,8	54,7	11,0	71,3	2,0		
Foin de luzerne	ND	(1)	ND	13,2	32,4	47,5	-23,9	76,9	5,5		
Ensilage de maïs	ND	8,4	ND	14,6	14,6	28,6				0,43	7,1
Maïs déshydraté	26,5	30,3	35,0	36,1	34,3	38,4	18,8	17,8	27,8		
Résidu de pressage	ND	13,4	ND	13,0	13,4	16,7				0,08	12,3

(1) Valeur négative

## (d) Azote total

Aliment	Disparition (D)						D = a + b (1 - e <sup>-ct</sup> )			D = at + b	
	2	4	8	12	24	48	a	b	c	a	b
Tourteau de soja	ND	44,8	ND	68,8	78,8	95,2	32,0	65,9	5,9		
Tourteau de colza	56,8	59,8	69,6	75,9	85,9	91,7	49,9	43,0	7,6		
Tourteau de tournesol	ND	80,0	ND	88,2	95,2	96,5	72,2	25,0	9,1		
Graine de lupin	80,9	83,8	85,8	92,7	97,1	99,3	77,2	22,9	7,9		
Son de blé	ND	56,7	ND	81,6	93,4	94,1	28,7	66,2	13,7		
Luzerne déshydratée 1	ND	45,7	51,3	63,2	80,1	89,7	30,8	63,4	5,8		
Luzerne déshydratée 2	39,5	42,7	48,7	50,8	71,1	85,7	35,1	72,3	2,6		
Foin de luzerne	ND	56,1	ND	67,3	73,6	81,6	49,8	33,9	5,5		
Ensilage de maïs	ND	84,4	ND	83,0	83,6	85,0				0,02	83,6
Maïs déshydraté	50,6	53,3	50,4	51,4	54,4	58,0				0,14	51,0
Résidu de pressage	ND	21,6	ND	24,0	22,8	33,0				0,25	19,9

blement dégradable (résidu de pressage du raisin) induisent des teneurs en ammoniac faibles. Le manque de disponibilité en azote pour les bactéries est probablement à la fois cause et conséquence du faible taux de dégradation de ces aliments. La variation dans le temps de la teneur en ammoniac du milieu de fermentation est généralement assez faible. Cette teneur

peut cependant prendre une valeur maximale dans le cas des tourteaux.

## DISCUSSION

Les cinétiques de disparition de la matière sèche et de ses constituants sont, le plus souvent, décrites par le modèle exponen-

Tableau III (suite)

(e) Azote insoluble dans le détergent neutre (NDIN)

Aliment	Disparition (D)						$D = a + b(1 - e^{-ct})$			$D = at + b$	
	2	4	8	12	24	48	a	b	c	a	b
Tourteau de soja	ND	9,8	ND	21,3	69,2	82,8	-12,0	112,3	4,2		
Tourteau de colza	41,5	49,5	55,5	60,5	69,2	82,2	39,5	46,6	4,8		
Tourteau de tournesol	ND	11,9	ND	48,6	71,7	77,3	-22,9	101,6	10,4		
Graine de lupin	19,6	33,3	50,1	58,2	82,6	91,5	8,1	85,5	8,0		
Son de blé	ND	49,2	ND	80,6	90,2	91,1	7,5	83,8	17,2		
Luzerne déshydratée 1	ND	28,5	23,8	45,2	70,0	84,9	8,5	90,0	4,2		
Luzerne déshydratée 2	2,6	31,7	36,5	41,2	56,1	80,0	5,1	77,9	5,5		
Foin de luzerne	ND	27,8	ND	32,9	34,9	57,3				0,66	23,7
Ensilage de maïs	ND	33,8	ND	41,3	46,2	48,5	27,6	21,3	8,7		
Maïs déshydraté	12,9	34,9	22,9	33,2	41,4	47,8	16,0	33,7	5,8		
Résidu de pressage	ND	9,4	ND	11,0	0,1	14,5				0,09	6,8

tiel négatif proposé par Ørskov et McDonald (1979) [ $p = a + b(1 - e^{-ct})$ ]. Ce modèle peut être caractérisé par 3 paramètres :

– la dégradabilité maximale, correspondant à l'ordonnée de l'asymptote de la courbe et représentée par la somme des paramètres  $a$  et  $b$  de l'équation,

– la dégradabilité instantanée, correspondant à l'ordonnée à l'origine de la courbe et représentée par le paramètre  $a$  de l'équation,

– la vitesse de dégradation de la fraction lentement dégradable qui est représentée par le paramètre  $c$  de l'équation.

Tableau IV. Évolution de la concentration en ammoniac (mg  $\text{NH}_3/100$  ml) des contenus des réacteurs au cours de la fermentation de différents aliments en Rusitec.

Aliment	Durées de fermentation (h)			
	0	4	12	24
Tourteau de soja	44,1	47,8	94,7	67,9
Tourteau de colza	37,2	22,8	44,2	47,1
Tourteau de tournesol	28,9	41,9	30,9	31,7
Son de blé	17,6	21,7	20,0	19,5
Graines de lupin	54,9	58,0	60,6	47,3
Luzerne déshydratée 1	14,4	16,0	13,6	15,3
Luzerne déshydratée 2	5,9	7,7	5,5	4,0
Foin de luzerne	11,4	44,6	12,5	20,3
Ensilage de maïs	1,5	4,8	1,9	1,2
Maïs déshydraté	0,11	0,12	0,05	0,12
Résidu de pressage	0,17	0,23	0,07	0,06

**Tableau V.** Valeurs des paramètres caractérisant les courbes moyennes de cinétique de dégradation de l'azote pour différents aliments (valeurs calculées à partir de *n* données bibliographiques obtenues *in situ* par la méthode des sachets).

Aliments	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	Références
Tourteau de soja	26	14,0	84,7	8,9	a, c, d, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, q, r, s, t, u, v, w, x
Tourteau de colza	12	25,4	66,3	10,0	a, e, h, k, o, q
Tourteau de tournesol	4	30,5	67,4	12,9	e, g
Lupin	1	74,3	21,9	34,3	e
Son de blé	1	50,0	42,0	16,1	a
Luzerne déshydratée	4	35,9	52,7	4,9	a, h, k, p
Foin de luzerne	11	39,5	48,2	8,7	b, k

a : Abe, 1983; b : Alvir *et al*, 1988; c : Armentano *et al*, 1986; d : Erdman *et al*, 1987; e : Freer et Dove, 1984; f : Firkins *et al*, 1984; g : Ganev *et al*, 1979; h : Ha et Kennelly, 1984; i : Hennessy *et al*, 1983; j : Kayouli *et al*, 1983; k : Kennelly *et al*, 1986; l : Kovacic *et al*, 1986; m : Kristensen *et al*, 1982; n : Lindberg, 1981; o : Lindberg et Varvikko, 1982; p : Mathers et Miller, 1981; q : Mir *et al*, 1984; r : Ørskov *et al*, 1983; s : Ørskov et McDonald, 1979; t : Stern *et al*, 1983; u : Stern *et al*, 1985; v : Ushida et Jouany, 1985; w : Weakley *et al*, 1983; x : Zerbini et Polan, 1985.

Les équations représentant la cinétique de dégradation de l'azote (tableau III) sont proches des équations moyennes établies à partir des mesures pratiquées par la méthode des sachets *in situ* par différents auteurs pour des aliments semblables (tableau V). En particulier, la localisation de l'asymptote, c'est-à-dire la valeur de  $a+b$  calculée à partir de nos résultats, est très peu différente de celle calculée d'après les résultats fournis par la bibliographie.

La différence la plus marquée concerne la localisation de l'ordonnée à l'origine, c'est-à-dire la valeur de *a*. Le paramètre *a* est souvent plus grand dans nos résultats *in vitro* que dans les résultats de la bibliographie obtenus *in situ*. Cette différence traduit une disparition plus forte de l'azote dans nos essais *in vitro* pour les faibles durées de fermentation. Elle peut aussi être due à une certaine contamination, par des fines particules solides, des résidus des sachets placés *in situ*. L'écart s'atté-

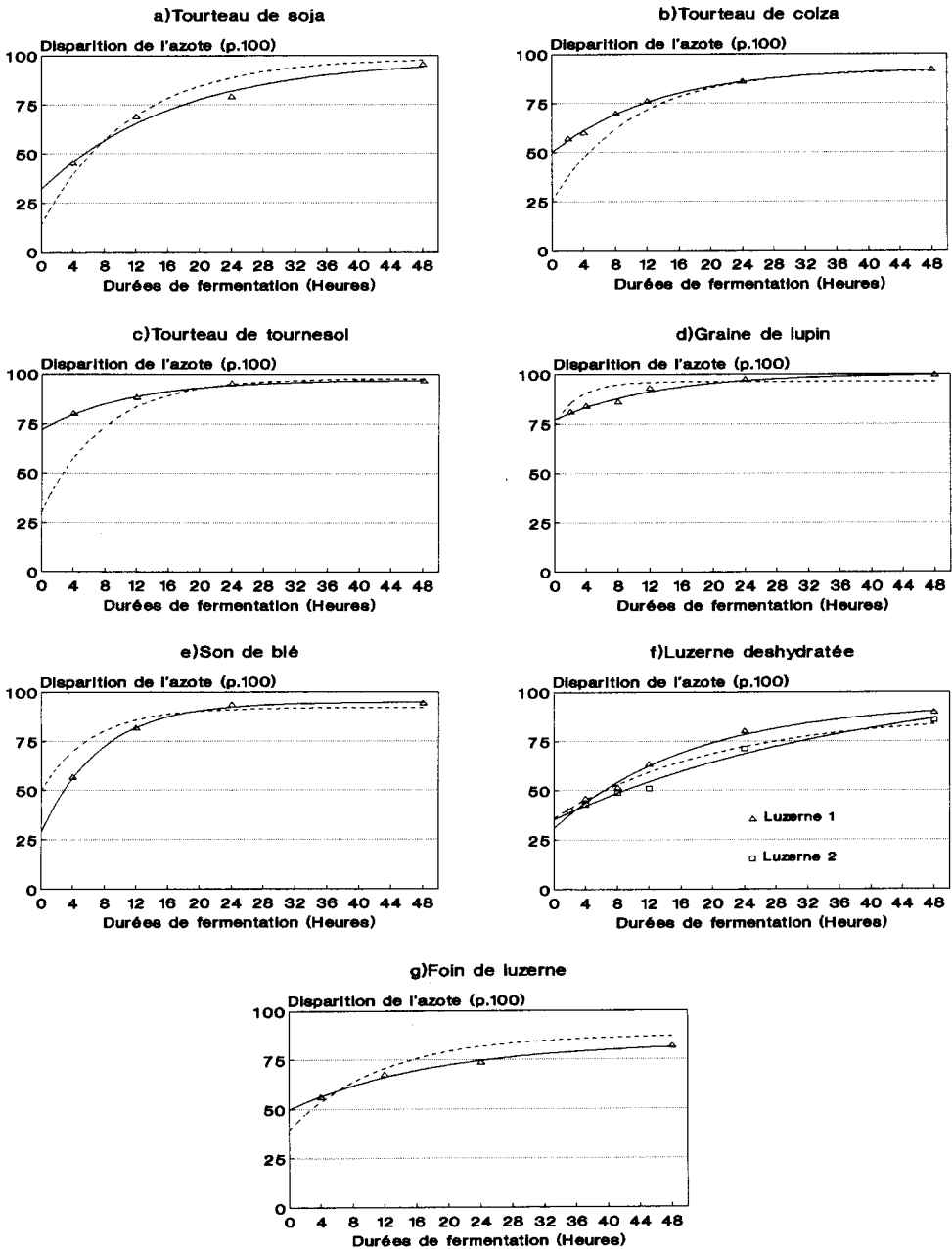
nue progressivement, la vitesse de disparition de la fraction lentement dégradable étant généralement un peu plus faible dans nos essais *in vitro*.

Les cas du résidu de pressage de raisin, de l'ensilage de maïs et du maïs déshydraté se caractérisent par une très faible vitesse de disparition de la fraction lentement dégradable. Pour ces aliments, le modèle exponentiel n'est pas satisfaisant dans nos conditions de mesure et il semble opportun de lui préférer le modèle linéaire voire, dans le cas de l'ensilage de maïs, une valeur constante.

### Dégradabilité maximale

Avec les aliments pour lesquels il a été possible d'utiliser le modèle exponentiel, la dégradabilité maximale de l'azote, estimée par l'ordonnée à l'origine de l'asymptote





**Fig 1.** Cinétiques de disparition de l'azote total pour différents aliments. Comparaison entre les résultats obtenus en Rusitec (—△) et les courbes établies à partir des données bibliographiques obtenues *in situ* et présentées dans le tableau IV (-----).

$[(a+b)_{NT}]$ , est assez étroitement liée à la disparition en 48 h ( $D_{NT48}$ ) :

$$(a + b)_{NT} = 0,599 \pm 0,275 D_{NT48} + 40,2 \pm 4,3 \quad r = 0,664; n = 8$$

Il est donc possible d'envisager la mesure de ce taux de disparition pour prévoir la dégradabilité maximale. Ces observations vont dans le même sens que celles d'Ørskov et McDonald (1979) selon lesquels, pour la plupart des aliments et régimes, le taux de disparition de l'azote pour une durée d'incubation de 24 h peut être une estimation satisfaisante de sa dégradabilité maximale.

La dégradabilité maximale de l'azote est aussi fortement liée à la composition des aliments et en particulier à la proportion de l'azote qui est insoluble dans le détergent acide de Van Soest ( $ADIN/N_T$ ) :

$$(a+b)_{NT} = -0,760 \pm 0,303 ADIN/N_T + 100,1 \pm 4,0 \quad r = -0,716; n = 8$$

Cette relation met en évidence l'effet de la protection des matières azotées par les constituants de l'ADF contre les fermentations, exprimé par la résistance de l'azote à la solubilisation dans le détergent acide de Van Soest. Compte tenu de la valeur prise par le terme constant (non différente de 100), elle permet de considérer la fraction indégradable comme proportionnelle à la fraction ADIN. Il paraît ainsi possible d'envisager la mesure de la fraction ADIN pour prévoir la dégradabilité maximale.

L'opportunité de la prise en compte de la fraction ADIN pour exprimer la résistance de l'azote aux fermentations dans le rumen est confirmée par la relation entre la dégradabilité maximale de la fraction NDIN  $[(a+b)_{NDIN}]$ , estimation de la dégradabilité maximum des matières azotées pariétales, et la part de ADIN dans NDIN :

$$(a+b)_{NDIN} = -1,073 \pm 0,348 ADIN/NDIN + 106,9 \pm 13,4 \quad r = -0,759; n = 9$$

Cette relation traduit l'effet de protection que des liaisons entre les protéines et la fraction ligno-cellulosique exercent sur la dégradation de ces protéines.

Les protéines liées à la fraction lignocellulosique des parois se trouvent protégées des actions microbiennes. Leur disparition, et par conséquent, celle de l'azote total est d'autant plus réduite que cette protection est plus développée. Krishnamoorthy *et al* (1982b) considèrent que la fraction azotée insoluble dans le détergent acide est absolument indégradable dans le rumen. Il n'est donc pas surprenant que la part de l'azote qui résiste aux fermentations soit proportionnelle à la part de la fraction ADIN dans l'azote total. Plusieurs auteurs ont mentionné la diminution de la dégradabilité de l'azote qui accompagne l'augmentation de la proportion de la fraction ADIN consécutive à un traitement à la chaleur (Lindberg *et al*, 1982; Pena *et al*, 1986). Cet effet du blocage de l'azote semble ici pouvoir être généralisé, indépendamment des traitements thermiques. Il ne paraît cependant pas possible d'attribuer une signification nutritionnelle simple aux coefficients de régression des équations.

### **Dégradabilité instantanée**

Le paramètre  $a$  du modèle exponentiel, estimation de la dégradation instantanée de l'azote, n'est étroitement lié à aucun des critères de composition chimique étudiés. Les meilleures relations sont obtenues avec la solubilité de l'azote dans la solution saline ( $NS/NT$ ) et avec la solubilité dans le détergent neutre de Van Soest ( $NDIN/NT$ ):

$$a_{NT} = 0,991 \pm 0,837 NS/N_T + 25,9 \pm 18,5 \quad r = 0,435; n = 8$$

$$a_{NT} = -0,872 \pm 0,296 \text{ NDIN}/N_T + 71,9 \pm 13,1$$

$$r = -0,769; n = 8$$

La difficulté pour expliquer le paramètre  $a$  avec des critères de composition chimique tient probablement au fait que, dans les équations décrivant la cinétique de disparition de l'azote total,  $a$  et  $b$  ne sont pas indépendants et que, pour des formes de courbes semblables,  $a$  peut prendre des valeurs très différentes. De plus, le modèle exponentiel utilisé ne tient pas compte d'un éventuel temps de latence appliqué à la dégradation de la fraction lentement dégradable, en particulier si ce temps de latence est inférieur à la plus courte des durées d'incubation testées.

### Vitesse de dégradation

Dans nos essais, la vitesse de dégradation de la fraction lentement dégradable de l'azote ( $c$ ) est négativement corrélée au rapport ADF/NDF

$$C_{NT} = -0,138 \pm 0,059 \text{ ADF}/\text{NDF} + 15,5 \pm 2,5$$

$$r = -0,693; n = 8$$

Cette relation caractérise l'effet de frein ou de protection de la fraction lignocellulosique sur l'attaque des matières azotées pariétales, et, par conséquent, sur la dégradation de l'azote lentement dégradable.

Cette protection est probablement plus forte lorsque les conditions de fermentation sont moins favorables aux activités cellulolytiques. Cette observation expliquerait, au moins partiellement, la diminution de la dégradation de l'azote des fourrages qui peut survenir lorsqu'on ajoute du concentré (céréale) dans la ration (Loerch *et al*, 1983; Weakley *et al*, 1983; Zinn et Owens, 1983).

### CONCLUSION

Les matières azotées végétales sont en partie résistantes à la solubilisation dans les détergents de Van Soest. Cette résistance peut être due à leur localisation dans les parois cellulaires ou à des liaisons chimiques que certains traitements technologiques ont pu occasionner. Elles sont un témoin de leur résistance aux activités microbiennes dans le rumen. Ainsi la solubilité de la matière organique, et spécialement de l'azote, dans les détergents de Van Soest serait un moyen de prédire les paramètres de l'équation décrivant la cinétique de dégradation de l'azote.

### RÉFÉRENCES

- Abe M (1983) Degradation properties and the susceptibility to degradation of feed protein in the rumen of cows. In: *4<sup>e</sup> Symp Int Métabolisme et nutrition azotés*, INRA, Publ, Versailles, 223-226
- Alvir MR, Gonzalez J, Argamentaria A (1988) Relations entre la composition chimique des foin de luzerne et la dégradabilité *in sacco* de leurs matières azotées. *Reprod Nutr Dev* 28, 1, 169-170
- Armentano LE, Herrington TA, Polan CE, Moe AJ, Herbein JH, Umstadt P (1986) Ruminant degradation of dried brewers grains, wet brewers grains and soybean meal. *J Dairy Sci* 69, 2124-2133
- Blanchart G, Vignon B (1984) Adaptation d'un fermenteur de type Rusitec. *Cah Tech INRA* 7, 1-10
- Blanchart G, Durand M, Barry JL, Bouiller-Oudot M, Jouany JP (1989) Intérêts et limites des fermenteurs à flux semi-continu de type Rusitec dans l'étude des fermentations du rumen. *Ann Zootech* 38, 285-314
- Cotta MA, Hespell RB (1986) Proteolytic activity of the ruminal bacterium *Butyrivibrio fibrisolvens*. *Appl Environ Microbiol* 52, 51-58
- Czerkawski JW, Breckenridge G (1977) Design and development of a long term rumen simu-

- lation technique (Rusitec). *Br J Nutr* 38, 371-384
- Driedger A, Hatfield EE (1972) Influence of tannins on the nutritive value of soybean meal for ruminants. *J Anim Sci* 34, 465-468
- Erdman RA, Proctor GH, Vandersall JH (1986) Effect of rumen ammonia concentration on *in situ* rate and extent of digestion of feedstuffs. *J Dairy Sci* 69, 2312-2318
- Firkins JL, Berger LL, Fahey GC Jr, Merchen NR (1984) Ruminal nitrogen degradability and escape of wet and dry distillers grains and wet and dry corn gluten feed. *J Dairy Sci* 67, 1936-1944
- Freer M, Dove H (1984) Rumen degradation of protein in sunflower meal, rapeseed meal and lupin seed placed in nylon bags. *Anim Feed Sci Technol* 11, 87-101
- Ganev G, Ørskov ER, Smart R (1979) The effect of roughage or concentrate feeding and rumen retention time on total degradation of protein in the rumen. *J Agric Sci* 93, 951-956
- Ha JK, Kennelly JJ (1984) *In situ* dry matter and protein degradation of various protein sources in dairy cattle. *Can J Anim Sci* 64, 443-452
- Hartnell KA, Satter LD (1978) Effect of Masonex (hemicellulose extract) on protein degradation by rumen microorganisms *in vitro* and *in vivo*. *J Anim Sci* 47, 935-943
- Hennessy DW, Lee GJ, Williamsson PJ (1983) Nitrogen loss from protein meals held in terylene bags in the rumen of cattle and the nutritive value of the residues. *Aust J Agric Res* 34, 453-467
- Jarrige R (ed) (1988) *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA, Paris, 476 p
- Kayouli C, Van Nevel C, Demeyer D (1983) Effet de la défaunation du rumen sur la dégradabilité des protéines du soja mesurée *in sacco*. 4<sup>e</sup> Symp Int Métabolisme et nutrition azotés, INRA Publ, Versailles, 251-254
- Kennelly JJ, Murphy JJ, de Boer G (1986) Relative value of feedstuffs as sources of rumen undegradable protein. *Agric For Bull*. Special issue 65th Annual Feeders' Day Report, 61-64
- Kovacik AM, Loerch SC, Dehority BA (1986) Effect of supplemental sodium bicarbonate on nutrient digestibilities and ruminal pH measured continuously. *J Anim Sci* 62, 226-234
- Krishnamoorthy U, Muscato TV, Sniffen CJ, Van Soest PJ (1982a) Nitrogen fractions in selected feedstuffs. *J Dairy Sci* 65, 2, 217-225
- Krishnamoorthy U, Sniffen CJ, Van Soest PJ (1982b) Nitrogen fractionation in ruminants feedstuffs for feed evaluation. *Canadian Nutrition Conference for Feed Manufacturers Proceedings* 95-102
- Kristensen ES, Moller PD, Hvelplund T (1982) Estimation of the effective protein degradability in the rumen of cows using the nylon bag technique combined with the outflow rate. *Acta Agric Scand* 32, 123-127
- Lindberg JE (1981) The effect of basal diet on the ruminal degradation of dry matter, nitrogenous compounds and cell walls in nylon bags. *Swedish J Agric Res* 11, 159-169
- Lindberg JE, Varvikko T (1982) The effect of bag pore size on the ruminal degradation of dry matter, nitrogenous compounds and cell walls in nylon bags. *Swedish J Agric Res* 12, 163-171
- Lindberg JE, Soliman HS, Sannes S (1982) A study of the rumen degradability of untreated and heat-treated rape seed meal and of whole rape seed, including a comparison between two nylon bag techniques. *Swedish J Agric Res* 12, 83-88
- Loerch SC, Berger LL, Gianola D, Fahey GR Jr (1983) Effect of dietary protein source and energy level on *in situ* nitrogen disappearance of various protein sources. *J Anim Sci* 56, 206-216
- Mahadevan S, Erfle JD, Sauer FD (1980) Degradation of soluble and insoluble proteins by *Bacteroides amylophilus* protease and by rumen microorganisms. *J Anim Sci* 50, 723-728
- Mathers JC, Miller EL (1981) Quantitative studies of food protein degradation and the energetic efficiency of microbial protein synthesis in the rumen of sheep given chopped lucerne and rolled barley. *Br J Nutr* 45, 587-604
- Mir Z, McLeod GK, Buchanan-Smith JG, Grieve DG, Grovum WL (1984) Methods of protecting soybean and canola proteins from degradation in the rumen. *Can J Anim Sci* 64, 853-865
- Nocek JE, Herbein JH, Polan CE (1983) Total amino acid release rates of soluble and insoluble protein fractions of concentrate feed-

- stuffs by *Streptomyces griseus*. *J Dairy Sci* 66, 1663-1667
- Nugent JHA, Jones WT, Jordan DJ, Mangan JL (1983) Rates of proteolysis in the rumen of the soluble proteins casein, fraction I (18S) leaf protein, bovine serum albumin and bovine submaxillary mucoprotein. *Br J Nutr* 50, 357-368
- Ørskov ER (1982) *Protein nutrition in ruminants*. Acad Press, Londres, p 160
- Ørskov ER, McDonald I (1979) The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *J Agric Sci* 92, 499-503
- Ørskov ER, Hughes-Jones M, Eliman ME (1983) Studies on degradation and outflow rate of protein supplements in the rumen of sheep and cattle. *Livest Prod Sci* 10, 17-24
- Pena F, Tagari H, Satter LD (1986) The effect of heat treatment of whole cottonseed on site and extent of protein digestion in dairy cows. *J Anim Sci* 62, 1423-1433
- SAS (1987) *SAS/Stat™ guide for personal computers* (version 6) SAS Inst Inc, Cary, NC, USA
- Stern MD, Ortega ME, Satter LD (1983) Retention time in the rumen and degradation of protein supplements fed to lactating dairy cattle. *J Dairy Sci* 66, 1264-1271
- Stern MD, Santos KA, Satter LD (1985) Protein degradation in rumen and amino acid absorption in small intestine of lactating dairy cattle fed heat-treated whole soybeans. *J Dairy Sci* 68, 45-56
- Thomas E, Trenkle A, Burroughs W (1979) Evaluation of protecting agents applied to soybean meal and fed to cattle. 1. Laboratory measurements. *J Anim Sci* 49, 1337-1345
- Ushida K, Jouany JP (1985) Effect of rumen protozoa on rumen protein degradation in sheep. *Reprod Nutr Dév* 25, 1075-1081
- Van Soest PJ (1963) Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. 2. A rapid method for the determination of fiber and lignin. *J Assoc Off Agric Chem* 46, 829-835
- Van Soest PJ, Wine RH (1967) Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. 4. Determination of plant cell wall constituents. *J Assoc Off Agric Chem* 50, 50-55
- Weakley DC, Stern MD, Satter LD (1983) Factors affecting disappearance of feedstuffs from bags suspended in the rumen. *J Anim Sci* 56, 493-507
- Zelter SZ, Leroy F, Tissier JP (1970) Protection des protéines alimentaires contre la désamination bactérienne dans le rumen. 1. Études *in vitro* : comportement en milieu du rumen de quelques protéines tannées avec du tannin de châtaignier ou certains aldéhydes (formaldéhyde, glutaraldéhyde, glyoxal). *Ann Biol Anim Biochim Biophys* 10, 111-122
- Zerbini E, Polan CE (1985) Protein sources evaluated from ruminating holstein calves. *J Dairy Sci* 68, 1416-1424
- Zinn RA, Owens FN (1983) Site of protein digestion in steers: predictability. *J Anim Sci* 56, 707-716