

MÉTHODES DE PRÉVISION DE LA VALEUR ALIMENTAIRE DES FOURRAGES

QUE CE SOIT POUR PRÉPARER LES PLANS DE RATIONNEMENT DES ANIMAUX EN STABULATION OU POUR SÉLECTIONNER LES PLANTES FOURRAGERES, IL FAUT DISPOSER DE critères permettant de prévoir la valeur nutritive des fourrages avec une précision satisfaisante et au coût le plus faible possible. Il est également intéressant d'être en mesure de prévoir la quantité de ces fourrages qui sera ingérée par les animaux dont ils constitueront la majeure partie ou la totalité de la ration. On fait appel à des techniques de série au laboratoire car les mesures directes sur animaux de la digestibilité et de la quantité ingérée sont très onéreuses.

Dans le monde entier, on a utilisé jusqu'ici presque exclusivement la méthode d'analyse chimique proposée voici un siècle à la Station allemande de WEENDE ; on estime la valeur énergétique à partir de la teneur en cellulose brute. De très nombreuses méthodes ont été proposées au cours des dix-huit dernières années pour la remplacer. Nous les examinerons très rapidement sans chercher à faire une étude bibliographique qui serait fort longue.

PREVISION DE LA TENEUR EN MATIERES AZOTEES DIGESTIBLES

Les constituants azotés des fourrages et des autres aliments sont résorbés dans le tube digestif des ruminants dans une proportion allant de 95 à 100 %.

Leur coefficient de digestibilité apparent, qui est mesuré, est plus faible parce que les fèces contiennent des produits azotés d'origine endogène ; la quantité d'azote fécal métabolique excrété est en moyenne de 5 g par kilo de matière sèche ingérée.

De cela il résulte que la teneur en matières azotées digestibles est rigoureusement liée à la teneur en matières azotées totales ($N \times 6,25$) de l'aliment. Les relations observées par les différents auteurs sont très voisines. Avec DEMARQUILLY, nous avons choisi d'exprimer la teneur en matières azotées digestibles par la différence entre la teneur en matières azotées totales et la teneur en matières azotées apparemment non digestibles, laquelle est très peu variable. Ces relations sont plus parlantes que les relations de régression et permettent de bien mettre en évidence les causes des faibles variations de la teneur en matières azotées non digestibles que voici :

Fourrages verts :

— graminées	4,48 (n = 693)
— légumineuses	4,56 (n = 127)
— ensemble	4,50 (n = 820)
Foins	4,81 (n = 85)
Fourrages ensilés	5,03 (n = 49)
Fourrages déshydratés	5,46 (n = 117)

Ainsi pour la majeure partie des cas on peut donc retenir les relations simplifiées suivantes :

— pour les fourrages verts	M.A.D. = M.A.T. — 4,5
— pour les fourrages conservés ..	M.A.D. = M.A.T. — 5,0

Mais deux catégories de fourrages s'écartent nettement de cette loi : d'une part les fourrages déshydratés dans de mauvaises conditions, qu'ils aient été chauffés trop longtemps ou qu'ils aient été portés à trop haute température ; d'autre part les ensilages qui se sont trop échauffés. Il faudrait y ajouter les foins bruts qui se sont eux aussi échauffés parce qu'ils n'avaient pas été engrangés suffisamment secs.

Exception faite de ces fourrages, heureusement peu nombreux, la teneur en M.A.D. est prévue avec précision à partir de la teneur en azote dosée au laboratoire. Ces M.A.D. ont une utilisation métabolique, une « valeur biologique » très comparables pour la plupart des fourrages à l'exception de

ceux qui donnent dans la panse une quantité excessive d'ammoniaque ; celle-ci passe dans le sang et est en majeure partie éliminée sous forme d'urée et perdue pour l'animal. C'est le cas des ensilages riches en azote et ayant subi une protéolyse intense...

PREVISION DE LA VALEUR ENERGETIQUE

La valeur énergétique du fourrage dépend avant tout de la teneur en matière organique digestible et par là du coefficient de digestibilité de la matière organique. On peut distinguer schématiquement trois catégories de constituants dans la plante :

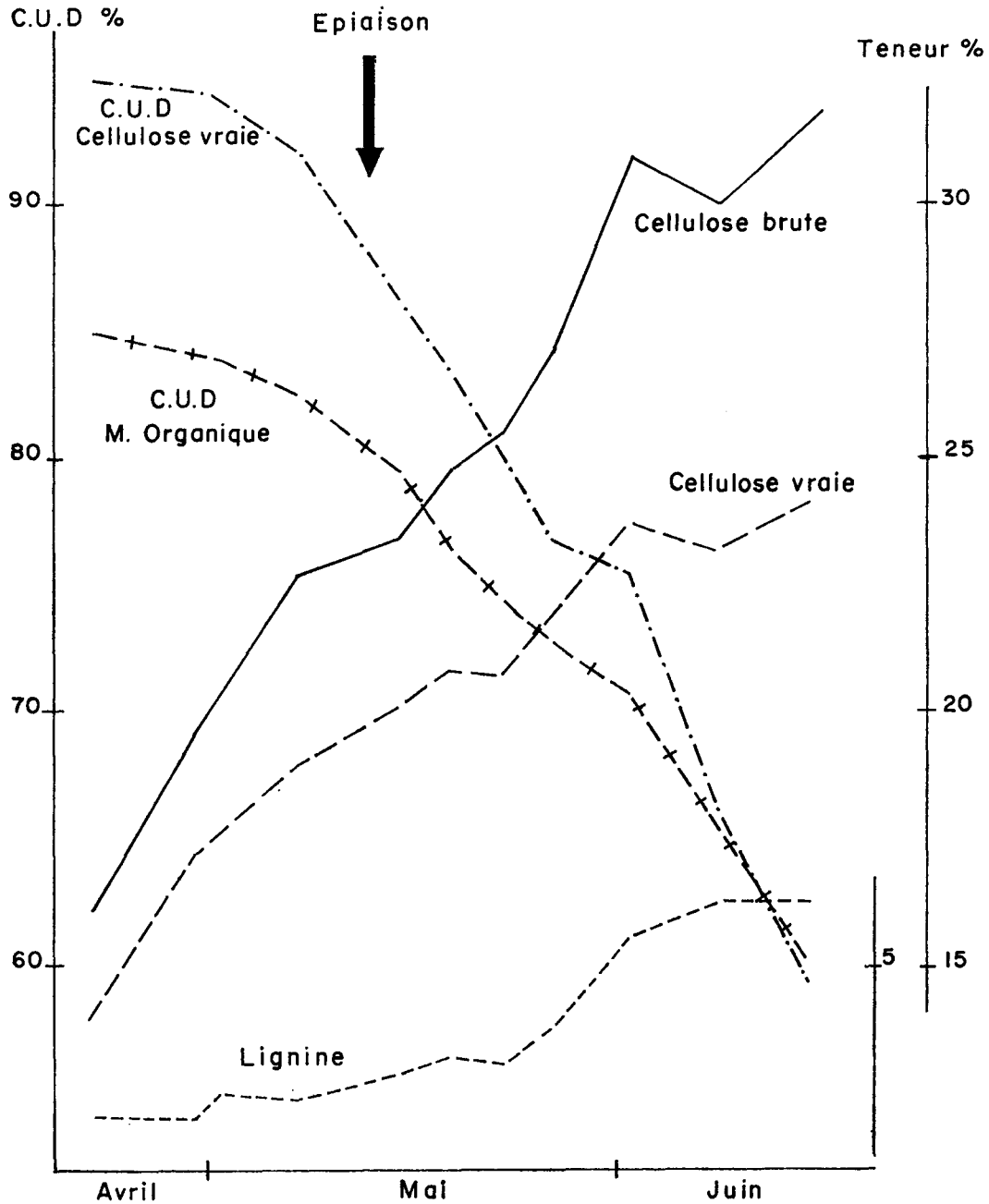
- les constituants du contenu cellulaire : sucres et fructosanes (amidon dans les grains), acides organiques, constituants azotés, lipides... ; on peut considérer qu'ils sont réellement digestibles en totalité (glucides) ou en quasi totalité ;
- les polysaccharides des membranes : cellulose, hemicelluloses et substances pectiques ; leur digestibilité peut varier dans des limites très larges : de plus de 90 % dans les jeunes graminées feuillues à 40 % dans les pailles (*cf.* figure 1 pour le premier cycle de croissance du ray-grass anglais) ;
- la lignine : c'est un glucide déposé dans la trame cellulosique des membranes ; en moyenne il est pratiquement indigestible.

Le coefficient de digestibilité du fourrage dépend donc de la proportion et de la digestibilité des membranes. Celle-ci diminue quand augmente la proportion des membranes dans la plante ainsi que leur lignification (*cf.* par exemple JARRIGE et MINSON, 1964). En termes histologiques, on peut dire que les tissus cellulotiques (parenchymes...) sont entièrement digestibles alors que les tissus lignifiés (sclérenchyme, tissus conducteurs...) sont presque entièrement indigestibles ; on les retrouve réduits à l'état de fines particules dans les fèces (E. GRENET, 1966).

Pour prévoir la digestibilité ou la teneur en matière organique digestible du fourrage, on dispose actuellement soit de méthodes chimiques qui dosent partie ou totalité des membranes, soit de méthodes biologiques où on cherche à séparer la fraction digestible de la fraction non digestible.

Figure 1

Evolution de la digestibilité et de la teneur en constituants membranaires au cours du premier cycle de végétation du ray-grass anglais.



1) Méthodes chimiques.

Le tableau I résume les principales méthodes chimiques qui ont été proposées pour prévoir la digestibilité des fourrages. Elles peuvent être réparties en trois groupes suivant leur objectif et leur rapidité de mise en œuvre.

TABLEAU I
PRINCIPALES METHODES DE LABORATOIRE PROPOSEES
POUR PREVOIR LE COEFFICIENT DE DIGESTIBILITE DES FOURRAGES

	<i>Auteurs</i>	<i>Détermination</i>	<i>Traitement</i>
<i>Méthodes chimiques :</i>			
I. — Dosage d'un résidu cellulosique	HENNEBERG et STOHRMAN (vers 1860).	Cellulose brute.	Hydrolyse par SO ₄ H ₂ 1,25 %
	KURSCHNER et HANAK (1930).	Cellulose.	Hydrolyse par NaOH 1,25 %
	GUILLEMET et JACQUOT (1943).	Insoluble formique.	Hydrolyse par CH ₃ COOH (80 %) NO ₂ H (d : 1,4)
	WALKER et HEPBURN (1955).	Lignocellulose (normal acid fibre)	Hydrolyse par l'acide formique à 80 % ; 30 mn.
	JARRIGE (1961).	Lignocellulose.	Dégraissage ; hydrolyse par SO ₄ H ₂ ; 1 heure.
II. — Solubilisation du contenu cellulaire	VAN SOEST (1963).	Lignocellulose au détergent (acid detergent fibre)	Dégraissage ; hydrolyse par SO ₄ H ₂ à 5 % ; 3 h.
	PALOHEIMO (1945).	Substances membranaires totales.	Hydrolyse par SO ₄ H ₂ en présence de détergent ; 1 heure.
III. — Fractionnement des constituants glucidiques	VAN SOEST et MARCUS (1964).	Constituants membranaires.	Dégraissage ; hydrolyse par HCl 0,05 n.
	JARRIGE (1961).	Glucides solubles, hémicelluloses, cellulose, lignine.	Extraction par une solution de détergent ; 1 heure.
	VAN SOEST (1963).	Lignocellulose au détergent (A.D.F.), lignine.	Extraction aqueuse ; dégraissage ; hydrolyse par SO ₄ H ₂ à 5 % (3 heures) ; hydrolyse par SO ₄ H ₂ à 72 %.
			Hydrolyse par SO ₄ H ₂ en présence de détergent : 1 heure ; hydrolyse de l'A.D.F. par SO ₄ H ₂ à 2 % pendant 3 heures.
<i>Méthodes biologiques :</i>			
I. — Digestibilité <i>in vitro</i> dans le jus de rumen (*)	TILLEY et TERRY (1963).	Matière sèche disparue.	Digestion <i>in vitro</i> du jus de rumen (48 heures) ; digestion par une solution de pepsine (48 h).
	DEMARQUILLY et CHENOST (1969).	Matière sèche disparue.	Digestion dans le rumen (48 h) ; digestion par une solution de pepsine HCl 0,1 n (48 heures).
III. — Digestion par des enzymes	TILLEY et TERRY (1964).	Matière sèche solubilisée.	Digestion par une solution de pepsine HCl 0,1 n (48 heures).
	JARRIGE et THIVEND (1969).	Matière sèche solubilisée.	Digestion par une solution saline (pH 4,6) d'une « cellulase » fongique (24 heures).

(*) Très nombreuses techniques.

a) Dans un premier groupe de méthodes on dose un résidu cellulosique par une hydrolyse acide, complétée éventuellement par une hydrolyse alcaline (méthode de WEENDE), ou renforcée par l'addition de détergents (méthode de VAN SOEST, 1963). Ce résidu cellulosique contient la totalité de la « cellulose vraie », partie ou totalité de la lignine ainsi que des résidus d'hémicelluloses ou de matières azotées.

La première de ces méthodes est naturellement le dosage de la cellulose brute qui, proposée voici un siècle, continue à être utilisée universellement bien que ses défauts et ses limites soient connus depuis longtemps. On a cherché à la remplacer pour des raisons qui étaient d'ailleurs différentes suivant les auteurs ; elles sont d'ordre : 1) biochimique : avoir un résidu de composition moins variable, notamment quant à sa teneur en lignine ; 2) nutritionnel : améliorer la précision de la prévision de la valeur nutritive ; 3) analytique : supprimer une hydrolyse et améliorer la reproductibilité des résultats.

Ce dernier argument est en définitive le plus important car les espoirs d'améliorer la précision de la valeur nutritive ont été généralement déçus. A titre d'exemple, le tableau II donne les valeurs des coefficients de corrélation et de l'écart type réduit (qui mesure la précision de l'estimation) que nous avons obtenues entre la digestibilité de la matière organique et les teneurs en cellulose brute, lignocellulose et lignine pour différentes catégories d'échantillons. Bien que contenant la totalité de la lignine en plus de la cellulose, la lignocellulose ne marque pas d'amélioration nette sur la cellulose brute. Il en est de même pour la lignocellulose au détergent (« acid detergent fiber », de VAN SOEST) mais celle-ci présente une indiscutable amélioration dans la rapidité d'exécution sur la cellulose brute.

Ces divers résidus cellulosiques présentent une liaison négative avec la digestibilité qui est plus ou moins étroite selon la catégorie d'échantillons. Elle est étroite lorsqu'on considère un ensemble d'échantillons prélevés tout au long du premier cycle de croissance (tableau II) ; la digestibilité diminue en même temps qu'augmente la teneur en cellulose vraie et en lignine (cf. figure 1 pour le ray-grass anglais) ; de plus l'amplitude de variation est très grande. Les liaisons sont en général beaucoup moins étroites si on considère les repousses (tableau II), ne serait-ce que parce que l'amplitude de variation est plus faible, ou les fourrages de la fin du premier cycle de croissance : à cette période la digestibilité diminue très rapidement alors que la teneur en cellulose vraie, cellulose brute, etc., augmente peu. Or, c'est à cette période

TABLEAU II

COEFFICIENTS DE CORRELATION ET ECARTS TYPE REDUITS
ENTRE LA DIGESTIBILITE DE LA MATIERE ORGANIQUE
ET QUELQUES CRITERES CHIMIQUES
(% de la matière sèche)

	<i>Ray-grass et dactyle</i>		<i>Luzerne et trèfle blanc</i>	<i>Foin de pré</i>
	<i>1^{er} cycle</i>	<i>repousses</i>		
Nombre d'échantillons ..	36	26	15	15
Extrait aqueux	r = 0,797 Syx = ± 5,40	r = 0,562 Syx = ± 3,66	r = 0,322 Syx = ± 6,45	r = 0,773 Syx = ± 3,45
Matières azotées	r = 0,829 Syx = ± 5,01	r = 0,236 Syx = ± 4,30	r = 0,796 Syx = ± 4,22	r = 0,673 Syx = ± 4,56
Cellulose vraie	r = -0,895 Syx = ± 3,99	r = -0,416 Syx = ± 4,02	r = -0,909 Syx = ± 3,64	r = -0,512 Syx = ± 4,67
Lignine corrigée	r = -0,969 Syx = ± 2,52	r = -0,857 Syx = ± 2,28	r = -0,951 Syx = ± 2,16	r = -0,641 Syx = ± 4,18
Lignocellulose	r = -0,940 Syx = ± 3,05	r = -0,684 Syx = ± 3,23	r = -0,949 Syx = ± 2,21	r = -0,733 Syx = ± 3,70
Cellulose brute	r = -0,913 Syx = ± 3,66	r = -0,515 Syx = ± 3,80	r = -0,888 Syx = ± 3,21	r = -0,708 Syx = ± 4,18

L'écart type réduit syx permet de chiffrer la dispersion de la valeur estimée y quand la valeur de x (servant à estimer y) est fixée.

que sont récoltés la majeure partie des fourrages conservés : rien d'étonnant à ce que leur digestibilité ne puisse pas être prévue avec une grande précision.

b) Un deuxième groupe comporte les méthodes par lesquelles on essaie de solubiliser le contenu cellulaire par des traitements relativement doux. On met en relation la digestibilité du fourrage, ou la teneur en matière organique digestible, soit avec la matière solubilisée, soit avec le résidu qui contient la totalité des membranes.

La matière sèche solubilisée par un simple traitement aqueux présente, pour la plupart des fourrages, une liaison positive significative avec la diges- 95
de la valeur alimentaire

tibilité (tableau II) mais elle est assez lâche (le coefficient de corrélation est du même ordre que pour la teneur en azote). La liaison devient beaucoup plus étroite lorsqu'on utilise une solution légèrement acide ou que l'on ajoute des détergents ; elle reste cependant moins satisfaisante que celle obtenue entre les résidus cellulosiques et la digestibilité.

c) Les méthodes précédentes étant très grossières sur le plan biochimique, on a évidemment pensé améliorer la prévision de la valeur nutritive du fourrage à partir d'une analyse plus détaillée de la fraction glucidique qui représente généralement plus des deux tiers de la matière sèche. Dans la méthode classique de WEENDE, elle est séparée en cellulose brute, qui est une estimation par excès mais assez satisfaisante de la cellulose vraie, et une fraction indéterminée dite extractif non azoté : celui-ci n'a aucune signification ni biochimique ni nutritionnelle puisqu'il contient à la fois les glucides du contenu cellulaire qui sont entièrement digestibles, la lignine qui est pratiquement indigestible et la majeure partie des polysaccharides des membranes autres que la cellulose.

Les méthodes de fractionnement des constituants glucidiques sont plus ou moins élaborées mais elles comportent toutes le dosage de la lignine (ou plutôt « d'une lignine »). De tous les constituants chimiques, c'est en effet la lignine qui représente en général la liaison la plus étroite avec la digestibilité du fourrage (*cf.* tableau II) parce qu'elle détermine la digestibilité des membranes. Nous avons proposé une méthode dans laquelle on dose successivement les glucides solubles, les hémicelluloses, la cellulose et la lignine (JARRIGE, 1961). En combinant ces différents constituants, ainsi que la teneur en matières azotées, dans une régression multiple, on arrive sans aucun doute à améliorer la prévision de la digestibilité par rapport à celle obtenue à partir de la teneur en cellulose brute. Il s'agit de savoir si cette amélioration justifie l'accroissement du coût de l'analyse et si cette méthode de fractionnement, ou toute autre qui lui soit comparable, peut être adoptée dans les laboratoires de série. La réponse était sans aucun doute négative tant que toutes les opérations étaient effectuées de façon artisanale. Leur mécanisation, qui est actuellement mise au point par le Père J. MAGNY, au L.A.R.A. de Purpan-Toulouse, va réduire leur coût dans des proportions considérables et la méthode devrait alors pouvoir s'appliquer au moins aux échantillons les plus importants des expérimentations pratiques.

Le schéma de fractionnement proposé par VAN SOEST (1963) aux U.S.A. est plus simple que le nôtre grâce à l'utilisation des détergents et à la

suppression du dosage direct des hémicelluloses. Il sera intéressant de comparer les deux schémas tant du point de vue nutritionnel que du point de vue prix de revient.

Les méthodes chimiques peuvent nous fournir une prévision de la digestibilité intéressante, dont la précision s'accroît au fur et à mesure qu'on approfondit le fractionnement des constituants glucidiques et qu'on calcule des équations par catégorie de fourrages de plus en plus homogène. Cependant la digestibilité des membranes ne dépend pas exclusivement de leur importance et de leur composition ; certains facteurs histologiques (localisation des tissus) et physiques (liaison entre constituants membranaires) peuvent sans doute intervenir. A la teneur des constituants membranaires, il faudrait ajouter un critère de leur digestibilité : c'est ce que permettent les méthodes biologiques.

2) Méthodes biologiques.

Digestion in vitro par du jus de rumen.

Les fourrages sont en majeure partie digérés ou remaniés dans le rumen sous l'action de la population microbienne qui en tire l'énergie et les substrats nécessaires à sa prolifération ; en particulier les constituants membranaires digestibles y sont digérés en quasi totalité. Dans les méthodes de digestion *in vitro*, on met dans un récipient en verre un échantillon de fourrage en présence de jus de rumen (*inoculum*) additionné d'une solution saline ; les conditions de température, de pH, d'anaérobiose sont aussi voisines que possible de celles du rumen. On met en relation la proportion de matière sèche disparue ou de cellulose disparue au cours de la fermentation avec la digestibilité *in vivo* du fourrage. De nombreuses méthodes ont été proposées entre 1955 et 1965 ; elles diffèrent par la préparation du jus de rumen, les proportions respectives de fourrage et de phase liquide, la technique opératoire, la mesure finale... (cf. revue de JOHNSON, 1966). La technique de TILLEY et TERRY (1963) fait suivre la fermentation (quarante-huit heures) par le jus de rumen d'une digestion par la pepsine (quarante-huit heures) qui simule dans une certaine mesure la digestion intestinale et améliore également la reproductibilité des résultats. Telle quelle, ou avec quelques modifications de détail, elle s'est avérée la plus intéressante dans les comparaisons qui ont été faites, notamment aux U.S.A. (OH et al., 1966 ; BARNES, 1969).

La proportion de la matière sèche disparue au cours de l'ensemble de ces deux traitements, dite digestibilité *in vitro* (D.I.V.), présente des relations très étroites avec la digestibilité *in vivo* des fourrages verts, tempérés ou tropicaux, et des fourrages conservés. Les relations sont en général plus étroites que pour les critères chimiques simples tels que la cellulose brute et la lignocellulose ; dans la plupart des études, la précision de la prévision de la digestibilité à partir de la D.I.V. est inférieure à ± 3 points. Intéressante du point de vue nutritionnel, la mesure de la D.I.V. s'adapte bien aux mesures de série et elle est plus coûteuse. C'est pourquoi elle a retenu l'attention des sélectionneurs qui ont besoin d'un critère global rapide de la valeur nutritive des fourrages, par exemple ceux du N.I.A.B. de Cambridge et de la Station d'Amélioration des Plantes Fourragères de Lusignan. Mais la mesure de la D.I.V. ne peut pas actuellement être mise en œuvre avec sécurité dans les laboratoires de série pour prévoir la valeur nutritive des fourrages récoltés dans les fermes. Sa reproductibilité n'est pas encore suffisante d'une série à l'autre (cf. BARNES, 1969) surtout par suite des variations de l'activité cellulolytique que l'*inoculum*. Celles-ci peuvent être atténuées en standardisant rigoureusement et le régime alimentaire des animaux fistulés qui fournissent le jus de rumen et les conditions du prélèvement de jus et de la préparation de l'*inoculum*. De même, on peut déceler les séries de résultats aberrantes par l'utilisation de fourrages témoins et de « blancs ». On peut espérer que ces variations seront progressivement expliquées et maîtrisées.

Digestion en présence d'enzymes.

Les difficultés d'application des méthodes précédentes de digestion *in vitro* (variation de l'activité du jus de rumen et nécessité d'entretenir des animaux porteurs d'une fistule du rumen) seraient écartées si on pouvait préparer, à partir du jus de rumen, une préparation enzymatique conservant la même activité. Nous n'en sommes pas là parce que le problème à résoudre est difficile et aussi parce qu'il n'a pas fait jusqu'ici, à notre connaissance, l'objet de recherches très poussées.

L'activité cellulolytique étant la caractéristique principale de la population microbienne du rumen, nous avons cherché à la reproduire à l'aide de préparation d'enzymes cellulolytiques, dites « cellulases » qui sont fabriquées industriellement à partir de champignons, à des fins pharmaceutiques. Après avoir utilisé avec peu de succès une première « cellulase » d'origine américaine qu'avaient expérimentée DONNEFER et al. (1963) au Canada, nous avons

eu plus de chance avec une « cellulase » française préparée par la S.E.A.B. de Jouy-en-Josas. Il s'agit en réalité d'un mélange d'enzymes qui attaque non seulement la cellulose mais aussi les hémicelluloses, les protéines, l'amidon : il a ainsi une action grossièrement semblable à celle du jus de rumen mais moins intense (JARRIGE et THIVEND, 1969).

Le résidu de cette digestion cellulasique pendant vingt-quatre heures permet de prévoir la digestibilité des principales catégories de fourrages avec une précision aussi bonne que la digestibilité *in vitro* suivant la méthode de TILLEY et TERRY (1963) et meilleure que la cellulose brute (tableau III, figures 2 et 3). La technique est simple, peu onéreuse et très reproductible ;

TABLEAU III

COEFFICIENT DE CORRELATION (ET ECART TYPE REDUIT)
ENTRE LA DIGESTIBILITE DE LA MATIERE ORGANIQUE *IN VIVO*
ET LE RESIDU CELLULOSE, LA DIGESTIBILITE *IN VITRO*,
LA TENEUR EN CELLULOSE BRUTE ET LA TENEUR EN LIGNOCELLULOSE

	Nombre	Résidu cellulose (% M.S.)	Digestibilité <i>in vitro</i> (%)	Cellulose brute WEENDE (% M.S.)	Lignocellulose (% M.S.)
<i>Légumineuses :</i>					
Fourrages verts ..	22	r = - 0,914 Syx = 2,59	r = 0,921 Syx = 2,48	r = - 0,878 Syx = 3,05	r = - 0,860 Syx = 3,25
Foins	15	r = 0,899 Syx = 2,37	r = 0,806 Syx = 3,21	r = - 0,814 Syx = 3,15	r = - 0,905 Syx = 2,31
Ensemble	37	r = 0,938 Syx = 2,64	r = 0,740 Syx = 4,81	r = - 0,851 Syx = 3,76	r = - 0,890 Syx = 3,26
<i>Herbe de prairies naturelles</i>	12	r = - 0,842 Syx = 3,16	r = 0,690 Syx = 4,38	r = - 0,816 Syx = 3,49	r = - 0,633 Syx = 4,68
<i>Ensilages</i>	29	r = - 0,842 Syx = 3,63	r = 0,804 Syx = 4,00	r = - 0,555 Syx = 5,60	r = - 0,776 Syx = 4,24
<i>Ensemble</i>	78	r = 0,793 Syx = 4,34	r = 0,754 Syx = 4,56	r = - 0,725 Syx = 4,78	r = - 0,825 Syx = 3,92

Figure 2

Relation entre le coefficient de digestibilité de la matière organique
et le résidu « cellulase ».

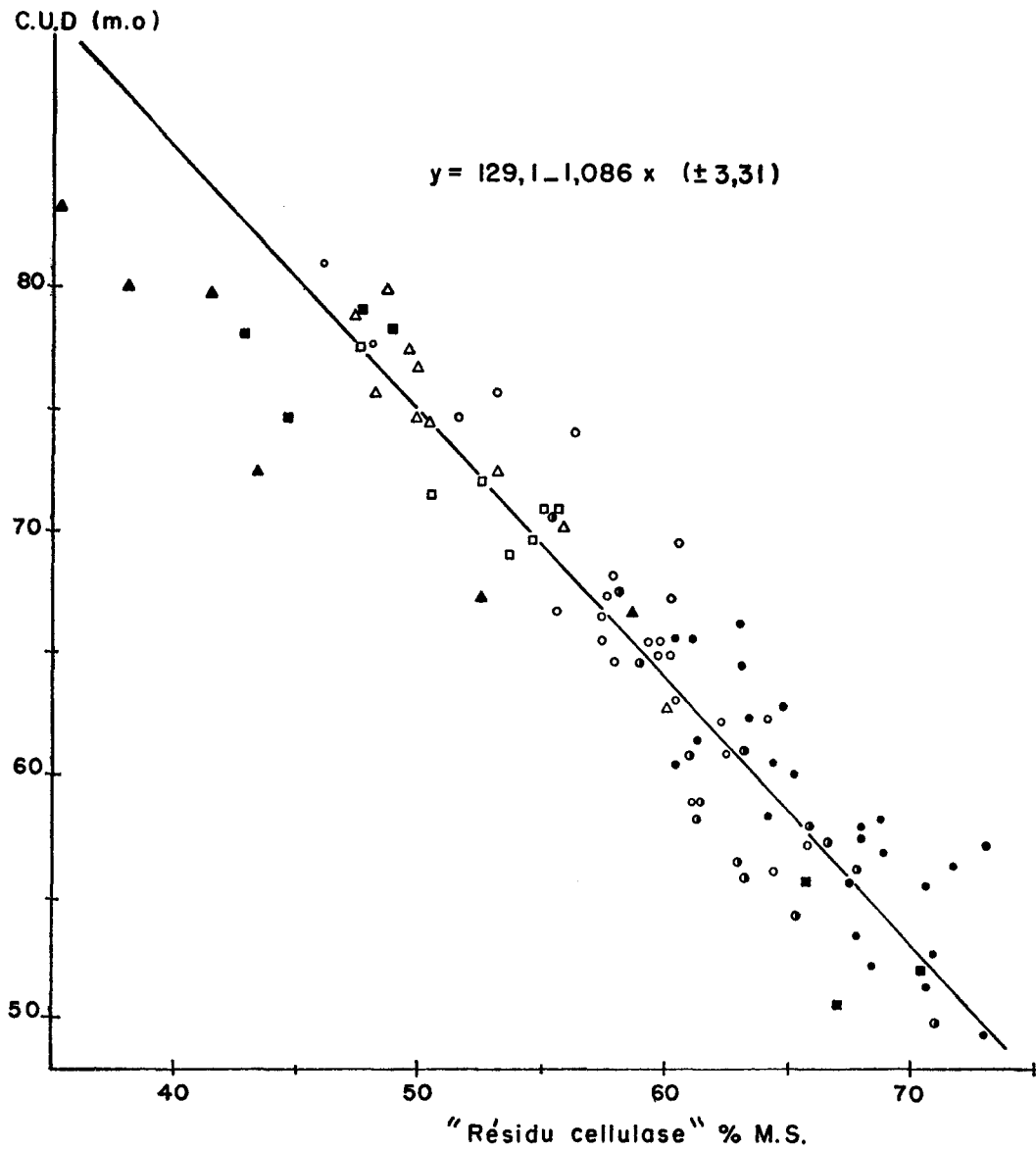
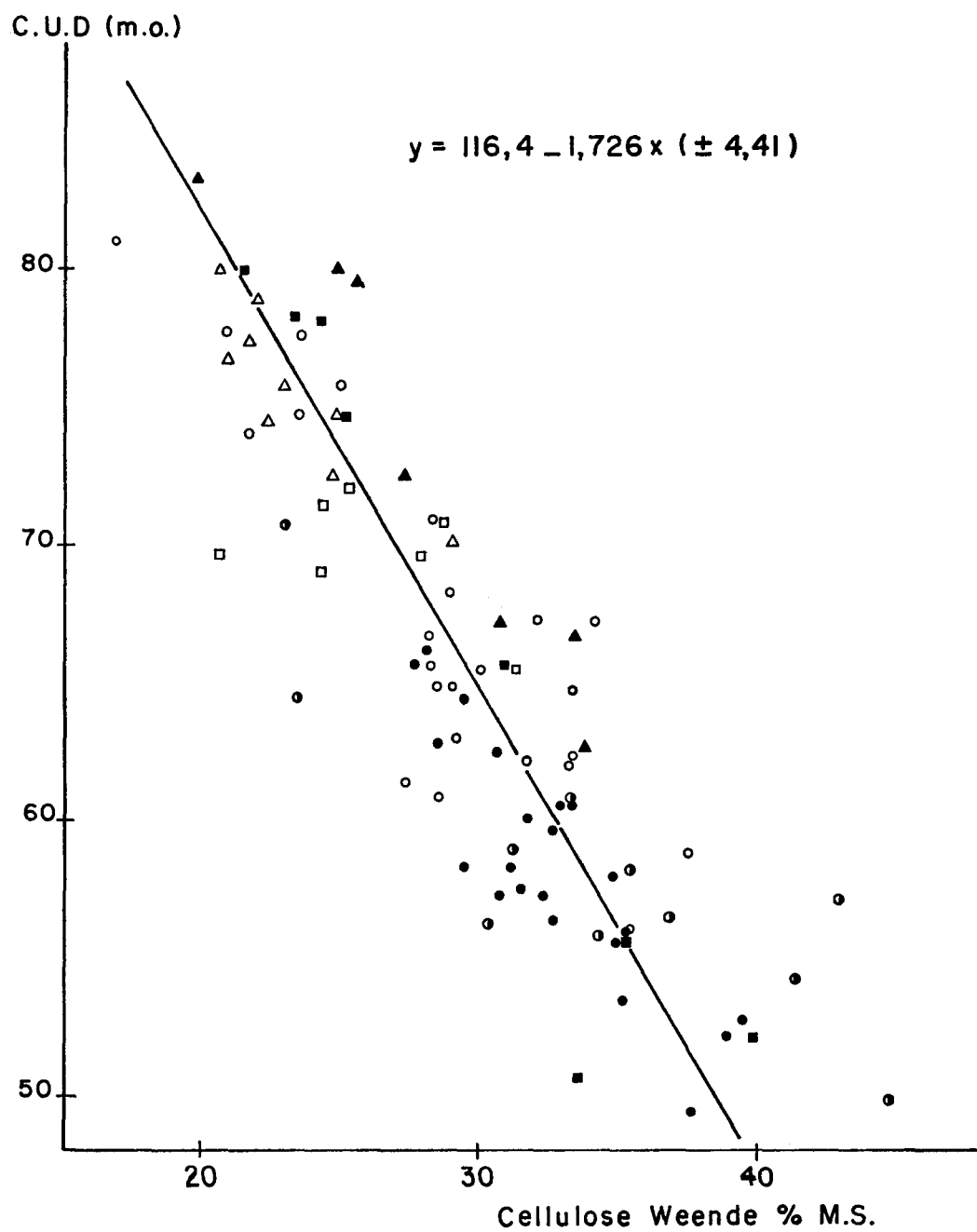


Figure 3

Relation entre le coefficient de digestibilité de la matière organique
et la teneur en cellulose brute pour les mêmes fourrages que ceux de la figure 2.



son adaptation à la détermination en grande série est à l'étude. Deux limites à son extension : d'abord les variations possibles de l'activité d'un lot de cellulase à l'autre, variation qu'on peut déceler et compenser en utilisant des fourrages témoins ; ensuite nous ne sommes pas assurés que la S.E.A.B. continuera à fabriquer cette cellulase... à moins que son utilisation pour les analyses de fourrages ne devienne un débouché majeur. Quoi qu'il en soit, il existe d'autres « cellulases » sur le marché international dont l'activité mériterait d'être étudiée.

La digestion du fourrage par une solution pepsique a été étudiée par DONEFER et al. (1963) au Canada et par TILLEY et TERRY (1964) en Grande-Bretagne. Elle a pour objectif d'entraîner la majeure partie des protéines en même temps que les autres constituants du contenu cellulaire. N'était la présence de l'enzyme, cette méthode se rattacherait au deuxième groupe des méthodes chimiques.

Digestion dans des sachets à l'intérieur du rumen.

On enferme de petits échantillons de fourrage (3 g) dans des sachets de nylon qui sont suspendus dans le rumen. On mesure la matière sèche disparue au bout de quarante-huit heures (DEMARQUILLY et CHENOST, 1969) ou de soixante-douze heures (LOWREY, 1969). Elle est un très bon critère de la digestibilité *in vivo*.

Cette méthode est probablement une des plus satisfaisantes du point de vue nutritionnel. Malheureusement sa précision est moins bonne que celle des méthodes examinées jusqu'ici, probablement en raison de l'hétérogénéité du contenu du rumen ; les déterminations doivent être conduites en triple pour que l'erreur soit inférieure à 2 %.

A l'issue de cette revue, d'ailleurs très incomplète, des méthodes permettant de prévoir la digestibilité des fourrages, deux questions se posent : 1) Faut-il conserver la méthode classique basée sur le dosage de la cellulose brute ? 2) Sinon, par quelle méthode faut-il la remplacer ? A ces questions nous ne pouvons pas apporter de réponse unique car il n'existe pas une méthode qui remplisse parfaitement les trois conditions souhaitées, à savoir : 1) Fournir une prévision précise de la digestibilité ; 2) Etre bien adaptée à la détermination en série, donc rapide et reproductible ; 3) Avoir un coût aussi réduit que possible. Cela n'a rien d'étonnant : on voit mal comment une mesure simple et peu onéreuse pourrait présenter une liaison étroite avec le coeffi-

cient de digestibilité de la matière organique qui est la résultante de phénomènes chimiques, physiques et enzymatiques extrêmement complexes. C'est probablement la digestibilité *in vitro* par la méthode de TILLEY et TERRY qui se rapprochera le plus de la méthode idéale dans la mesure où on pourra maîtriser et améliorer sa reproductibilité.

Le choix de la méthode doit dépendre de l'objectif poursuivi, de la précision désirée par rapport au coût et aussi, parfois, de l'origine des échantillons. Voici quelques exemples :

a) Le sélectionneur a besoin d'une méthode très rapide qui lui permette de comparer la valeur nutritive de nombreuses plantes qui sont récoltées au même stade ; il n'a pas besoin de donner à chacune une valeur U.F. aussi précise que possible. La digestibilité *in vitro*, la digestion par la cellulase ou la lignocellulose au détergent correspondent le mieux à ses besoins.

b) On peut conserver pour l'instant le dosage de la cellulose brute pour les échantillons de fourrages tout venant qui sont analysés pour préparer les plans de rationnement hivernaux. A la place des tables hollandaises, on utilisera les nouvelles équations et abaques que préparent DEMARQUILLY et WEISS ; la prévision sera améliorée : en effet, les nouvelles équations reposent sur de plus grands nombres d'échantillons ; elles sont calculées par espèces et elles peuvent faire intervenir d'autres facteurs, tels que l'âge des fourrages. Dès maintenant, on pourrait envisager de substituer la lignocellulose au détergent, voire le résidu cellulasique à la cellulose brute, en raison des avantages partiels dont ces critères ont fait preuve dans nos essais. Cependant, on ne peut abandonner la méthode de la cellulose brute et renoncer au capital de résultats qu'elle a permis d'accumuler, que si la nouvelle méthode apporte un gain global suffisant en tenant compte des critères nutritionnels, analytiques et économiques. Nous devons donc compléter le dossier : d'une part à la Station nous comparerons sur de plus grands nombres d'échantillons de chaque catégorie de fourrages les équations liant la digestibilité aux teneurs en cellulose brute, lignocellulose au détergent et résidu cellulasique et nous pourrons comparer la précision obtenue ; d'autre part quelques laboratoires de série devront comparer l'adaptation à la série, la reproductibilité et le coût de ces trois méthodes.

c) On a besoin de prévoir avec plus de précision la valeur nutritive de certains échantillons de fourrages : fourrages préparés dans le cadre d'essais par exemple sur la fumure, les méthodes de récolte et de conservation, four-

rages de référence dans les enquêtes régionales sur les prairies naturelles (cf. plus loin), fourrages nouveaux pour lesquels on manque de données... Il faut alors avoir recours à une analyse chimique plus complète ou à la digestibilité *in vitro* ou en sachets combinée éventuellement avec certains critères chimiques. Cela nécessite un équipement plus ou moins important et, dans tous les cas, un personnel qualifié dont seuls quelques laboratoires peuvent disposer.

PREVISION DE LA QUANTITE INGEREE

Distribués à volonté et comme aliment unique, les fourrages sont consommés en quantités extrêmement variables comme l'illustrent bien les tableaux de DEMARQUILLY et WEISS. On n'a pas pris entièrement conscience de ce fait et on ne l'a expliqué qu'au cours des dix dernières années. La quantité ingérée dépend avant tout de la vitesse avec laquelle le fourrage est digéré et réduit en fines particules dans le rumen. Cette vitesse dépend d'une part de la masse de membranes à dégrader et de leur résistance à l'attaque microbienne et, d'autre part, de l'activité de la population microbienne, laquelle est avant tout fixée par la proportion et la nature des constituants du contenu cellulaire, les constituants azotés tout particulièrement. Comme la digestibilité du fourrage dépend dans une bonne mesure de ces mêmes facteurs, on comprend que la quantité ingérée varie en moyenne dans le même sens que la digestibilité (BLAXTER et al., 1961 ; DEMARQUILLY, 1965).

La prévision de la quantité ingérée est d'un intérêt moins général que celle de la valeur nutritive ; elle est surtout utile lorsque les fourrages sont distribués à volonté et représentent la majeure partie ou la totalité de la ration. Nous examinerons donc très rapidement les méthodes qui ont été proposées au cours des dernières années en les répartissant en trois catégories : chimiques, physiques et biologiques.

1) Méthodes chimiques.

D'une façon générale, tous les critères chimiques qui présentent une liaison avec la digestibilité en présentent aussi une avec la quantité ingérée et avec la quantité de matière organique digestible ingérée qui mesure au mieux la valeur alimentaire du fourrage : c'est notamment le cas de la cellulose brute et de tous les autres résidus cellulosiques.

Cependant, la quantité ingérée est estimée avec la meilleure précision à partir des critères caractérisant la proportion des membranes ou du contenu cellulaire ou celle des constituants solubles : constituants solubles dans l'eau ou dans une salive artificielle (JARRIGE et THIVEND, 1969) ou, mieux encore, dans une solution acide diluée (DEHORITY et JOHNSON, 1964), ou dans une solution de pepsine dans HCl 0,075 n (DONEFER et al., 1963).

2) Méthodes biologiques.

La digestibilité *in vitro* et la digestibilité en sachets sont de bons critères de la quantité ingérée lorsqu'elles sont conduites pendant de courtes périodes : huit heures (fourrages verts) ou vingt-quatre heures (foin) et douze heures (fourrages verts et ensilages) ou vingt-quatre heures (foin) respectivement (DEMARQUILLY et CHENOST, 1969) au lieu de quarante-huit heures lorsqu'on veut estimer le coefficient de digestibilité *in vivo*. Cela confirme bien que c'est la vitesse de digestion dans le rumen qui règle avant tout la quantité ingérée.

Des fourrages qui ont un même coefficient de digestibilité *in vivo* et une même digestibilité *in vitro* ou en sachets au bout de quarante-huit heures, peuvent être ingérés en quantités différentes. Ceux qui sont digérés le plus vite, donc qui ont une digestibilité *in vitro* ou en sachets plus élevée au bout de vingt-quatre heures, sont ingérés en plus grande quantité ; c'est notamment le cas des légumineuses par rapport aux graminées.

En combinant deux déterminations de la digestibilité *in vitro* ou en sachets, l'une courte (\leq vingt-quatre heures) pour caractériser la quantité ingérée et l'autre plus longue (quarante-huit heures) pour caractériser la digestibilité, on obtient une des meilleures estimations de la valeur alimentaire du fourrage (DEMARQUILLY et CHENOST, 1969).

3) Méthodes physiques.

CHENOST (1966) a montré que l'énergie nécessaire pour broyer un fourrage variait en sens inverse de la quantité ingérée, les limites de variation sont considérables : en valeur relative de 1 à 10 lorsqu'on compare une herbe jeune à une paille ; des observations semblables ont été effectuées au Canada par TROELSEN et BIGSBY (1964).

Cette relation résulte du fait que la résistance au broyage dépend avant tout de la proportion des membranes. Elle est à rapprocher de la relation inverse très étroite qui existe entre la quantité ingérée et le temps de mastication (ingestion + rumination) par kg de matière sèche : $r = -0,98$ pour les rations (vingt-six) étudiées par JOURNET sur les vaches laitières.

Sa simplicité, d'ailleurs plus apparente que réelle, sa rapidité et son caractère très concret rendent la méthode de CHENOST très attrayante pour les laboratoires de série, voire de campagne. Malheureusement, l'appareillage n'est pas encore parfaitement au point et la reproductibilité des mesures n'est pas suffisante en raison d'une part de l'hétérogénéité des fourrages, d'autre part des variations dans le mode d'introduction du fourrage dans le broyeur. Il faut actuellement répéter environ six fois les mesures pour avoir une estimation satisfaisante. Beaucoup de progrès sont certainement possibles dans le domaine des méthodes physiques.

CONCLUSIONS

Le recours aux techniques de laboratoire, disons à « l'analyse » pour simplifier, doit tenir compte du fait nouveau qu'apporte la publication des tableaux de la valeur alimentaire des fourrages français de DEMARQUILLY et WEISS. Il devient inutile, lorsqu'il s'agit de prévoir la valeur énergétique d'un fourrage vert d'espèce pure dont on connaît le numéro de cycle et le stade de croissance, mais c'est là l'exception. L'analyse apporte une information très importante dans la plupart des cas mais elle doit être utilisée dans toute la mesure du possible en complément des indications fournies par les « tableaux » ; il n'est pas rationnel d'envoyer à l'analyse des échantillons dont on ne connaît pas la date de récolte, le stade et le cycle de croissance, les conditions de récolte et de la conservation.

L'analyse est plus intéressante pour les catégories de fourrage pour lesquelles les « tableaux » sont imprécis. C'est d'abord le cas du foin, notamment s'il est récolté par mauvais temps, et des ensilages ; « l'analyse » complète fort utilement les indications des « tableaux » qui ne donnent que la diminution de la valeur nutritive pour chaque condition de récolte ; de plus, elle seule caractérise les produits terminaux de la fermentation des ensilages. « L'analyse » est souvent indispensable pour prévoir la valeur nutritive des fourrages de prairies permanentes puisque les tableaux ne donnent, pour l'instant, que

l'exemple d'une prairie normande ; nous avons indiqué les grandes lignes d'une étude systématique de ces fourrages dans la préface des tableaux.

En résumé, l'utilisation conjuguée des « tableaux » avec les observations qu'elle implique et de « l'analyse » doit permettre d'améliorer considérablement la prévision de la valeur nutritive des fourrages. Pour être pleinement efficace, cette prévision doit être organisée chaque année à l'échelle de la région naturelle et s'appuyer sur un certain nombre de fourrages de référence : ces fourrages, produits sur des prairies bien représentatives, feront l'objet d'observations très complètes au champ et d'études de laboratoire plus complètes : composition détaillée ou digestion *in vitro* combinée à des critères chimiques rapides, composition minérale. Les résultats de ces fourrages de référence devront être connus assez tôt à l'automne pour situer la valeur nutritive des fourrages de l'année par rapport à celle des fourrages des années précédentes.

R. JARRIGE,

*Station de Recherches
sur l'Élevage des Ruminants,
I.N.R.A., C.R.Z.V. de Theix (63).*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- BARNES (1969) : National conference on forage quality evaluation and utilization. Nebraska, September 3-4, 1969.
- BLAXTER K.L., WAINMAN F.W., WILSON R.S. (1961) : *Anim. Prod.* 3, 51.
- CHENOST M. (1966) : *Ann. Zootech.* 15, 253-257.
- DEHORITY B.A., JOHNSON R.R. (1964) : *J. Anim. Sci.* 23, 203-207.
- DEMARQUILLY C. (1965) : « Proc. 9th Intern. Grassland Congress Sao Paulo », p. 877-885.
- DEMARQUILLY C., CHENOST M. (1969) : *Ann. Zootech.* 18, 419-436.
- DEMARQUILLY C., WEISS P. (1970) : « Tableaux de la valeur alimentaire des fourrages », édité par le S.E.I. de l'I.N.R.A.
- DONEFER E., NIEMAN P.J., CRAMPTON P.W., LLOYD L.E. (1963) : *J. Dairy Sci.*, 46, 965.
- GRENET Elisabeth (1966) : *Ann. Zootech.* 15, 303-312.
- JARRIGE R. (1961) : *Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys.* 1, 163-212.
- JARRIGE R., MINSON D.J. (1964) : *Ann. Zootech.* 13, 117-150.
- JARRIGE R., THIVEND P. (1961) : *Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys.*, 1, 421-447.
- JARRIGE R., THIVEND P. (1969) : *Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys.*, 9, 171-190.
- JOHNSON R.R. (1966) : *J. Anim. Sci.*, 25, 855-875.
- LOWREY R.S. (1969) : Nat. Conf. on forage quality evaluation and utilization. Nebraska, September 3-4, 1969.
- OH HI KON, BAUMGARDT B.R., SCHOLL J.M. (1966) : *J. Dairy Sci.*, 49, 850-855.
- TERRY R.A., TILLEY J.M.A. (1964) : *J. Brit. Grassl. Soc.*, 19, 363-372.
- TILLEY J.M.A., TERRY R.A. (1963) : *J. Brit. Grassl. Soc.*, 18, 104-111.
- TROELSEN J.E., BIGSBY F.W. (1964) : *J. Anim. Sci.*, 23, 1139-1142.
- 108 VAN SOEST P.J. (1963) : *J. Assn. Official Agric. Chem.*, 46, 829.