

L'ANALYSE DES ALIMENTS DESTINÉS AUX ANIMAUX ET L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS QU'ELLE FOURNIT

PAR

G. CHARLET-LERY,

A. FRANÇOIS.

A. M. LEROY⁽¹⁾

Chargée de recherches
à l'I.N.R.A.,

Chargé de recherches
à l'I.N.R.A.,

Professeur à l'Institut
national agronomique

Laboratoire de zootechnie de l'Institut national agronomique, Paris

PLAN DU MÉMOIRE

- 1° **Exposé de la méthode classique d'analyse.** — Précautions à prendre pour obtenir des résultats suffisamment précis et fidèles. Défectuosités de cette méthode.
- 2° **Modifications proposées pour l'amélioration de la méthode précédente.** — Dosage de la cellulose vraie, de la lignine, des glucides hydrolysables à l'ébullition, des pentosanes. Définition et dosage de l'insoluble formique. Dosage des pectines et de l'acide pectique ; ses difficultés.
- 3° **Digestibilité comparée des constituants formant la fraction ternaire dégraissée d'un aliment.** — Comparaison des résultats de l'analyse d'un aliment et de la digestibilité des substances entrant dans sa composition.
- 4° **Détermination éventuelle du coefficient de digestibilité de la matière organique contenue dans l'aliment d'après l'examen des résultats de l'analyse.** — Comparaison avec les résultats fournis par l'expérimentation directe.

PREMIÈRE PARTIE

EXPOSÉ DE LA MÉTHODE CLASSIQUE D'ANALYSE DES ALIMENTS

Précautions à prendre pour obtenir des résultats suffisamment précis et fidèles Défectuosités de cette méthode

La méthode couramment employée pour l'analyse des aliments du bétail est entièrement conventionnelle, et ses principaux mérites sont sa simplicité

(1) Avec la collaboration technique de M^{me} BOZZI et de M^{rs} LAGUIONIE et MARTIN.

et sa relative rapidité d'exécution. Mais pour obtenir des résultats comparables, il importe de respecter scrupuleusement certaines précautions, en l'absence desquelles de graves causes d'erreurs peuvent se produire.

Cette méthode est suffisamment connue pour que nous puissions nous dispenser d'en exposer le protocole détaillé. Celui-ci a fait d'ailleurs l'objet d'une publication assez récente de l'Institut Professionnel de Contrôle et de recherches scientifiques des Industries de l'alimentation animale (1). Nous nous bornerons à en commenter certaines dispositions, en raison du caractère essentiel de ces dernières.

Rappelons qu'il importe tout d'abord de veiller avec le plus grand soin à la préparation de l'échantillon. Celui-ci doit être d'autant plus finement divisé qu'il présente au premier aspect moins d'homogénéité. Les foins et les mélanges composés, dans la formule desquels entrent des substances possédant des densités fort différentes, doivent être divisés avec le maximum de précaution, sous la surveillance d'un personnel habitué à l'exécution de cette tâche particulièrement délicate. On n'oubliera pas, au cours de cette préparation, que le passage dans les appareils mécaniques chauffe la matière et peut lui faire perdre une certaine fraction de l'eau qu'elle contient. Il faut tenir compte de cette perte en comparant les résultats du dosage de l'eau avant et après le travail mécanique de division. Le taux d'humidité étant ainsi connu, tous les résultats ultérieurs seront rapportés à 1 000 g de matière sèche du produit initial.

L'analyse porte successivement sur la détermination des matières minérales, par incinération à 550 degrés centigrades, sur la détermination de l'azote à l'aide de la méthode de Kjeldahl, sur le dosage des lipides par une extraction à l'alcool bouillant, suivie par une seconde extraction à l'éther sulfurique, et enfin, sur deux hydrolyses successives d'une durée d'une demi-heure chacune, la première avec une solution d'acide sulfurique à 1,25 p. 100 et la seconde, avec une solution de soude de même concentration. Après chaque hydrolyse, les substances non dissoutes sont séparées par centrifugation et lavées avec soin. Le résidu de la seconde hydrolyse, après dessiccation, pesée et incinération pour permettre de déduire le poids des cendres, donne ce qu'il est convenu de désigner sous le terme de cellulose Weende, du nom de la Station Agronomique Allemande où cette méthode a été mise au point (crude fiber des auteurs anglais et américains).

Les conventions à adopter pour obtenir des résultats comparables sont les suivantes : tout d'abord, pour le calcul de la teneur en matières azotées, on admet la nécessité de multiplier la quantité d'azote N indiquée par le dosage Kjeldahl, soit par le coefficient moyen des protéines, 6,25, soit par des coefficients variables selon les substances qu'il s'agit de doser. Or, les matières azotées contenues dans les fourrages, les grains et les tourteaux forment un mélange complexe de protéines vraies, d'amides, et de substances diverses, dont les proportions varient parfois d'un échantillon à l'autre, pour une même catégorie d'aliments, de telle sorte que le passage de la quantité d'azote au

poids exact de l'ensemble des matières azotées exige théoriquement l'usage d'un coefficient spécial pour chaque groupe de produits. Afin d'éviter cette complication, il est logique d'accepter comme compromis un coefficient arbitraire. Dans les calculs qui font l'objet de cet exposé, nous avons fait usage du coefficient 6,25, à l'imitation de nos Collègues du Royaume-Uni et des U. S. A.

Le résultat fourni par le dosage des lipides à l'aide de la double extraction correspond à un mélange de glycérides, de stérides, de phospholipides et d'impuretés, dont les pigments divers présents dans les végétaux forment une importante fraction. Ces derniers sont particulièrement abondants dans les fourrages verts et les foin. Avec FRANÇOIS, nous avons montré que les glycérides représentent de 30 à 95 p 100 de cet ensemble de corps, les proportions les plus élevées s'observant pour les grains, les issus de grains et les tourteaux, et les plus faibles pour les foin (2).

La cellulose Weende ne correspond pas à un produit pur. C'est, en réalité, un mélange de cellulose vraie, de la fraction la plus difficilement hydrolysable des polyholosides non cellulosiques (mannanes, galactanes, xylanes, arabanes) et de lignine. La fraction de cette dernière dans le mélange obtenu par la méthode de Weende est d'autant plus grande que la masse insoluble fournie par le dosage est elle-même plus élevée, ainsi que le montrent les données ci-après :

TABLEAU I

Variation de la teneur en lignine de la cellulose Weende en fonction du taux de cette cellulose

Désignation de l'aliment	Cellulose Weende pour 1 000 g de matière sèche	Lignine dans cette cellulose Weende	Lignine
			Cellulose Weende %
Mais	22	0	0
Tourteau d'arachide	72	2	2,8
Avoine	99	10	10,1
Son de blé	128	23	18,0
Betterave.....	112	27	24,1
Foin de luzerne, avant flo- raison	355	122	34,4
Foin de luzerne, ordinaire..	406	151	37,1

Cependant, cette règle présente quelques exceptions. Les pailles, en particulier, fournissent un exemple d'aliment riche en cellulose mais relativement peu lignifié (cellulose Weende : 400 — lignine 124 — lignine p. 100 de la cellulose 31 p. 100).

La différence entre le poids de la matière organique et la somme « matières azotées + matières grasses + cellulose Weende » forme ce que l'on convient d'appeler les extractifs non azotés. Il s'agit d'un mélange complexe essentiellement composé d'oses, d'osides, de polyholosides non cellulosiques (amidon, fructosanes, glucosanes, mannanes, galactanes, xylanes, arabanes),

d'hémicelluloses uroniques, de composés pectiques et de lignine. Les constituants de ce mélange sont assez facilement décomposés dans l'appareil digestif des animaux, sous l'action des enzymes provenant, soit de l'animal lui-même, soit de microorganisme extrêmement nombreux et actifs. Le coefficient d'utilisation digestive de ces extractifs non azotés par l'animal est très sensiblement voisin de celui de la matière organique prise dans son ensemble, ce qui est une bonne preuve de la valeur alimentaire de ces substances.

L'utilisation de ces mêmes procédés pour l'analyse des matières fécales correspondant à une alimentation déterminée soulève également de graves objections. Le dosage des matières azotées ne permet pas de séparer les résidus azotés provenant de la fraction non digérée des aliments des nombreux corps microbiens vivants ou morts, des suc digestifs non résorbés et des débris de l'épithélium intestinal, qui constituent en fait ces matières. Le bilan brut de l'azote que l'on peut établir ainsi ne donne pour cette raison qu'un aspect de l'ensemble du problème, et une étude plus complète des phénomènes de la digestion exigeant la séparation de ces diverses catégories de déchets se heurte en fait à des difficultés expérimentales difficilement surmontables.

Les mêmes difficultés se retrouvent, à propos de l'analyse, par la double extraction à l'alcool et à l'éther, des lipides fécaux. Une grande partie de ceux-ci proviennent des sécrétions glandulaires de l'animal, et la séparation de ces dernières exige des manipulations chimiques qui compliquent au point de la rendre impossible l'exécution en séries des analyses indispensables à la conduite d'une expérience.

Si le dosage de la cellulose Weende dans les matières fécales échappe à ces critiques, puisque les matériaux dosés par cette méthode ne peuvent avoir qu'une origine alimentaire, la détermination par différence des extractifs non azotés fournit presque toujours un résultat entaché d'erreur, car l'emploi du coefficient 6,25 pour le calcul des matières azotées fécales ne peut fournir en effet qu'une approximation grossière de la masse totale de ces substances.

L'importance des erreurs commises au cours de l'exécution des analyses d'aliments a fait l'objet d'un examen attentif de la part de A. FRANÇOIS. Dans l'ensemble, les résultats obtenus pour la matière organique sont connus à 0,4 p. 100 près, sauf, pour la détermination de la cellulose Weende, qui, plus délicate que les autres, entraîne des erreurs de l'ordre de 3,5 p. 100 (3).

DEUXIÈME PARTIE

MODIFICATIONS PROPOSÉES POUR L'AMÉLIORATION DE LA MÉTHODE PRÉCÉDENTE

Pour obtenir une meilleure compréhension des phénomènes de la digestion, il est indispensable de modifier les techniques précédemment exposées.

L'ensemble des matériaux ternaires formés de la cellulose Weende et des

extractifs non azotés, qui correspond principalement aux glucides de réserve et aux matériaux des parois cellulaires des matières végétales analysées, représente de 40 à 90 p. 100 de l'ensemble de la matière sèche des aliments. La division en deux fractions, dont l'une fort mal définie, de l'ensemble de cette masse, apparaît par trop simpliste, et il est possible, sans trop de complications analytiques, de séparer de la manière suivante ce que nous désignerons dorénavant sous le nom de substances organiques ternaires dégraissées, mélange d'hydrates de carbone, de composés pectiques et de lignine dont la dénomination se justifie par le fait qu'il est exclusivement composé de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, ces deux derniers étant en proportions légèrement différentes de celles des éléments de l'eau.

a) Dosage de la cellulose vraie

Parmi les méthodes de dosage de la cellulose vraie, nous avons porté notre choix sur la méthode à l'acide nitrique, décrite par KURSCHNER (4), de préférence à la méthode à l'hypochlorite de CROSS et BEVAN. De nombreux dosages de recouplement effectués avec l'aide de la méthode au brome de G. BERTRAND prise comme référence (5) nous a montré que la technique de KURSCHNER joignait à sa rapidité d'exécution une précision fort acceptable. En voici le principe :

La matière première séchée à l'étuve à 105° est dégraissée successivement à l'ébullition, par l'alcool éthylique et l'éther sulfurique. Elle subit ensuite une attaque par la soude à l'ébullition, puis par un mélange d'alcool et d'acide nitrique concentré. L'insoluble obtenu est lavé à plusieurs reprises par de l'eau distillée maintenue chaque fois à l'ébullition pendant une demi-heure.

b) Dosage de la lignine

Il existe, dans la littérature, de nombreuses méthodes de dosage de la lignine. Parmi ces dernières, nous avons choisi le traitement par l'acide sulfurique à 72 p. 100, à froid, décrit par MAHOOD et CABLE (6).

La matière première séchée et dégraissée est mise en contact pendant une vingtaine d'heures, à la glacière, avec l'acide concentré. Par dilution dans l'eau, le taux de l'acide est ramené à 3 p. 100. La solution ainsi obtenue est portée à l'ébullition, et traitée pendant deux heures. Au cours de ce traitement brutal, la lignine initiale perd un certain nombre des groupements — OCH_3 de sa molécule, de telle sorte que le résultat du dosage est légèrement inférieur à la masse de lignine initiale. Des observations effectuées par nos soins montrent que cette erreur est de 7, 3 p. 100 pour la lignine du foin de luzerne, et de 4,0 p. 100 pour la lignine provenant des matières fécales de ruminants alimentés avec ce même foin (7).

c) Dosage des glucides hydrolysables à l'ébullition

Les glucides hydrolysables sont formés d'osides et de polyosides non cellulosiques, ainsi que de corps uroniques ; ces glucides proviennent soit du protoplasma cellulaire, soit des membranes des cellules.

Pour obtenir une hydrolyse suffisamment complète de ces corps, il convient de traiter la matière finement divisée, à l'ébullition, par une solution d'acide sulfurique à 2 p. 100. Après neutralisation, défécation et filtration la détermination de la teneur en sucres de l'hydrolysate est effectuée par la méthode Bertrand. Les résultats obtenus sont exprimés en glucose.

d) Dosage des pentosanes

Il est utile, pour une meilleure connaissance du métabolisme des glucides, de doser à part les pentosanes, par l'un des procédés classiques imaginés dans ce but. Nous utilisons la précipitation du furfural par l'acide barbiturique, selon la méthode d'UNGER et JAGER (7) après hydrolyse chlorhydrique de la matière à analyser. Le résultat est exprimé en xylanes.

e) Dosage de l'insoluble formique

L'emploi de l'acide formique pour le dosage des matériaux cellulosiques des grains et des tourteaux a été préconisé par GUILLEMET et JACQUOT (8). Nous utilisons cette méthode en traitant par l'acide formique la fraction de l'aliment ayant résisté à l'hydrolyse au cours du dosage des glucides hydrolysables, dans les conditions suivantes :

On part de 2 g d'aliment, que l'on soumet d'abord à une hydrolyse à l'ébullition, pendant une demi-heure, sous l'action d'une solution d'acide sulfurique 2 N. La fraction non dissoute est recueillie et lavée par centrifugation. Elle est ensuite traitée, au bain-marie bouillant, par 60 cc d'acide formique à 80 p. 100. Le résidu, après lavage pour le débarrasser du réactif, est entraîné dans une capsule de silice, séché, puis pesé. Après déduction du poids des cendres résultant de la calcination, on obtient l'insoluble formique, que l'on exprime en grammes par kilogramme de matière sèche du produit initial.

Le résidu obtenu par cette méthode correspond très sensiblement à la somme de la cellulose vraie (cellulose KURSCHNER) et de la lignine. Il est plus grand que le résultat obtenu par la méthode de Weende, puisque ce dernier ne comprend que la fraction de la lignine particulièrement résistante à l'attaque par la solution diluée de soude. R. GUILLEMET et P. HAMEL ont déjà signalé que l'insoluble formique correspond sensiblement à la somme « cellulose vraie + lignine ». Nous avons pu constater que l'hydrolyse préalable fournit une meilleure corrélation entre les deux séries de valeurs.

Dans un certain nombre d'aliments, nous avons dosé l'insoluble formique,

la cellulose WEENDE, la cellulose vraie selon KURSCHNER et la lignine. Voici les résultats de ces dosages, qui ont porté sur des fourrages, des grains, des tourteaux et des mélanges alimentaires complexes.

TABLEAU II

Dosages comparés de l'insoluble formique, de la cellulose Weende, de la cellulose vraie et de la lignine dosée

Désignation de l'aliment	Insoluble formique I. F.	Cellulose Weende C. W.	Cellulose vraie C.	Lignine dosée L.	Somme Cell. vraie + Lignine dosée C. + L.	Rapport Cell. + Lignine / Ins. formique
Herbe de prairie...	309	249	246	76	322	1,04
Foin de luzerne 1.	370	352	266	136	402	1,09
» 2.	391	358	236	137	373	0,95
» 3.	392	375	240	120	360	0,92
» 4.	371	356	238	144	382	1,02
» 5.	417	406	308	162	470	1,12
Paille	531	438	384	124	508	0,96
Betterave	112	112	72	28	100	0,89
Pulpe de betterave	258	223	199	43	242	0,94
Son de blé	166	133	87	71	158	0,95
Avoine	147	89	100	56	156	1,06
Mais	37	25	24	17	41	1,11
Tourteau de colza .	204	134	69	111	170	0,83
» de lin...	176	91	68	81	149	0,85
» de coprah	211	142	160	73	233	1,10
Pulpe avec son ...	225	182	152	64	216	0,96
Foin avec pulpe ..	340	317	251	111	362	1,06
Foin avec son 1 ..	289	257	150	100	250	0,86
Foin avec son 2 ..	342	321	206	110	316	0,92
Foin, son et pulpe.	297	267	194	109	303	1,02

Moyenne du rapport $\frac{C. + L.}{I. F.} = 0,98 \pm 0,14$

La concordance entre l'insoluble formique et la somme de la cellulose vraie et de la lignine peut être considérée comme satisfaisante, si l'on tient compte des erreurs de dosages provenant, soit de l'échantillonnage, soit de l'exécution des techniques utilisées.

f) Dosage des composés pectiques

Les matières végétales contiennent une quantité plus ou moins considérable de composés pectiques. Les fourrages verts, le marc de pomme, les racines et tubercules, ainsi que la pulpe de betterave en renferment notamment d'importantes quantités. En revanche, les pailles, les grains et leurs sous-produits (sons et tourteaux) n'en contiennent que fort peu. Il convient de distinguer entre l'acide pectique et les pectines proprement dites, lesquelles sont des esters méthyliques de l'acide polygalacturonique, porteurs d'un nombre variable de groupements méthoxyles OCH_3 . Ainsi que l'ont montré A. M. LEROY et A. MICHAUX (9), ces corps sont utilisables en majeure partie par l'organisme

animal bien que les détails de leur métabolisme demeurent en grande partie inconnus.

Brièvement résumée, la technique du dosage des composés pectiques est la suivante :

La prise d'essai, après extraction des lipides par l'alcool et l'éther bouillants est traitée à l'ébullition par de l'eau, puis, successivement, par une solution faible d'acide chlorhydrique et une solution diluée de carbonate de sodium, afin de séparer le mieux possible pectine, pectose et acide pectique. La solution aqueuse provenant des deux premiers traitements est concentrée, puis additionnée de cinq fois son volume d'alcool chlorhydrique, afin de précipiter la pectine, qui est ensuite purifiée. L'extrait alcalin est traité de son côté par une solution de chlorure de calcium, afin d'obtenir du pectate de calcium, lequel est transformé ultérieurement en acide pectique par l'acide chlorhydrique.

Malheureusement, ces dosages, qui comportent des manipulations longues et délicates, se prêtent fort mal à des analyses en série. Pour cette raison, en dépit des intéressants renseignements qu'ils peuvent fournir, nous n'avons pu les effectuer que sur un petit nombre d'aliments, ainsi que sur les fèces correspondants. Mais les résultats obtenus nous ont permis de calculer approximativement les quantités de ces substances dans un certain nombre d'aliments de mélanges, en effectuant des calculs d'interpolation à partir des données de A. MICHAUX (11-12). Nous nous sommes servis spécialement pour les foins, de l'existence d'une excellente corrélation entre le taux de cellulose vraie dans la matière sèche de l'aliment et la teneur en composés pectiques correspondante.

TROISIÈME PARTIE

ÉTUDE DE LA DIGESTIBILITÉ COMPARÉE DES CONSTITUANTS DE L'ENSEMBLE DES SUBSTANCES ORGANIQUES TERNAIRES DÉGRAISSÉES

Afin de montrer l'intérêt de ces modifications analytiques, il était indispensable d'effectuer un certain nombre d'expériences de digestibilité. Sur des bœufs et des moutons soumis à un régime simple, composé soit de foin seul, soit de foin et d'aliments concentrés, pulpe sèche de betterave, son de blé — nous avons procédé à des mesures précises d'ingesta et d'excreta, complétées par des analyses détaillées des aliments réellement ingérés et des fèces correspondants. Chaque période expérimentale était précédée par une période d'accoutumance au régime d'une durée d'au moins cinq jours pour les porcs, dix jours pour les ruminants. — Les périodes d'observation proprement dites avaient des durées respectives de sept et dix jours. Voici, à titre d'exemple, comment se présente l'analyse d'un foin de luzerne, distribué à des bovidés et

réellement consommé par eux, c'est-à-dire après déduction des matériaux composant les refus.

TABLEAU III

Analyse d'un foin de luzerne

Toutes les données de ce tableau sont rapportées à 1 000 g de matière sèche

Matières minérales	77
Matières organiques.....	923

Composition des matières organiques :

Matières azotées (N × 6,25)	150												
Matières grasses extraites par l'alcool et l'éther	46												
Substances organiques ternaires dégraissées	727												
Insoluble formique 427	<table> <tr> <td>Cellulose vraie</td> <td>261</td> <td rowspan="2">} Cellulose Weende 388</td> </tr> <tr> <td>Lignine insoluble dans les réactifs de Weende</td> <td>127</td> </tr> </table>	Cellulose vraie	261	} Cellulose Weende 388	Lignine insoluble dans les réactifs de Weende	127							
Cellulose vraie	261	} Cellulose Weende 388											
Lignine insoluble dans les réactifs de Weende	127												
Glucides hydrolysables (en glucose) 226	<table> <tr> <td>Lignine soluble dans les réactifs de Weende.....</td> <td>39</td> <td rowspan="5">} Extractifs non azotés 339</td> </tr> <tr> <td>Pentosanes exprimés en xylanes.....</td> <td>99</td> </tr> <tr> <td>Autres glucides (par différence) exprimés en glucose</td> <td>127</td> </tr> <tr> <td>Corps pectiques (directement dosés)</td> <td>48</td> </tr> <tr> <td>Substances diverses non identifiées</td> <td>26</td> </tr> </table>	Lignine soluble dans les réactifs de Weende.....	39	} Extractifs non azotés 339	Pentosanes exprimés en xylanes.....	99	Autres glucides (par différence) exprimés en glucose	127	Corps pectiques (directement dosés)	48	Substances diverses non identifiées	26	
Lignine soluble dans les réactifs de Weende.....	39	} Extractifs non azotés 339											
Pentosanes exprimés en xylanes.....	99												
Autres glucides (par différence) exprimés en glucose	127												
Corps pectiques (directement dosés)	48												
Substances diverses non identifiées	26												

On voit ainsi que la fraction non identifiée, obtenue par différences correspond à un peu moins de 3 p. 100 de la masse de matière organique.

Remarquons tout d'abord que la concordance entre l'insoluble formique et la somme de la cellulose vraie et de la lignine dosée, n'est pas toujours aussi satisfaisante que ne l'indique notre tableau. D'autre part, la différence entre la cellulose WEENDE et la cellulose vraie ne correspond pas exactement à la fraction de la lignine insoluble dans la soude à 1,25 p. 100, car il est possible de mettre en évidence dans la cellulose WEENDE de faibles quantités d'hémicelluloses, dont des pentosanes.

Mais l'objection la plus sérieuse que l'on puisse faire à un tableau de résultats tel que le précédent provient du fait que les produits d'hydrolyse désignés sous le terme de glucides hydrolysables proviennent de substances qui diffèrent les unes des autres par leur pouvoir réducteur. En particulier, les acides uroniques libérés des hémicelluloses et des composés pectiques par l'hydrolyse ont un effet réducteur nettement moins élevé que ceux des pentoses et des hexoses qui les accompagnent.

Pour cette raison, l'ensemble de ces glucides exprimé en glucose, ce qui correspond aux anhydrides primitifs augmentés de 10 p. 100, se trouve ainsi nanti d'une erreur par défaut. En revanche, la fraction réductrice des composés pectiques, qui intervient dans ce dosage, correspond à une erreur par excès, puisque ces corps, dans leur totalité, sont obtenus par une détermination directe. D'après A. MICHAUX (II), les quantités de substances réductrices provenant de 100 g de composés pectiques, exprimées en galactose, sont les suivantes :

TABLEAU IV

Produits analysés :	Foin de luzerne 1	Foin de luzerne 2	Foin de luzerne 3	Marc de pomme	Paille	Pulpe de betterave
Substances réductrices en galactose	22,1 g	23,2 g	18,6 g	34,1 g	40,0 g	37,8 g

Il est donc possible, d'après ces données, de déduire de l'ensemble des glucides hydrolysables l'effet réducteur correspondant aux substances pectiques, (acide pectique, acides pectiniques) directement dosées. On peut également, connaissant par leur dosage direct les quantités de pentosanes contenues dans les échantillons analysés, calculer le pouvoir réducteur correspondant à ces pentosanes exprimés en xylose (1).

D'autre part, ainsi que nous l'avons dit précédemment, nous savons que la lignine dosée est privée par le traitement sulfurique d'une partie de ses groupements méthoxy. Pour les foins, notamment, la quantité de lignine in situ qui disparaît au cours du dosage est d'environ 7 p. 100. Il nous a paru utile tenir de compte de cette perte, et nous avons ainsi calculé ce que nous avons appelé la « lignine totale corrigée » obtenue en affectant le taux de lignine dosée du coefficient de majoration appropriée.

Dans ces conditions, nous préférons détailler les résultats de nos analyses de la manière ci-après, en ce qui concerne la partie ternaire dégraissée.

TABLEAU V

Cellulose vraie	261
Lignine totale dosée 166 :	
Lignine insoluble dans la soude 1,25 %	127
Lignine totale corrigée 177 :	
Lignine soluble dans la soude 1,25 %	39
Pentosanes.....	99
Composés pectiques	48
Glucides en C ₆ et indéterminé par différence	142
Pouvoir réducteur des corps uroniques et hexosanes, déduction faite de celui dû aux pentosanes et aux composés pectiques : en glucose. ..	107,5

Nous sommes ainsi conduits à admettre, d'après cet exemple, que les 142 g de corps uroniques et de polymères en C₆ ont un pouvoir réducteur égal à celui de 107,5 g de glucose. Remarquons, pour le déplorer, que le dosage par différence des corps uroniques et des hexosanes demeure critiquable, en l'absence d'une méthode d'évaluation des corps uroniques suffisamment rapide pour pouvoir se prêter à des analyses en série.

Avec l'aide des données expérimentales recueillies au cours de 31 essais de digestibilité, dont 9 avec bœufs, 19 avec moutons et 3 avec porcs, nous avons pu dresser le tableau ci-après (tableau VI), qui donne pour chaque essai la composition des aliments consommés, ainsi que les coefficients de digestibilité des constituants de ces aliments calculés au moyen des résultats de l'analyse des matières fécales recueillies pendant chaque expérience.

Nous remarquons tout d'abord, qu'il existe des différences essentielles entre les coefficients de digestibilité des différents groupes de substances séparés par l'analyse. Tandis que les glucides en C₆ et les corps uroniques, d'une part,

(1) En réalité, le dosage des pentosanes par la méthode à l'acide barbiturique est entaché d'une légère erreur par excès. Les acides uroniques sont en effet générateurs de furfural dans les conditions de ce dosage. Nous avons obtenu, pour 100 g d'acide galacturonique pur, une quantité de furfural correspondant à 23,3 g de pentoses, exprimés en xylose. D'après les données du tableau IV, on en peut déduire que l'erreur commise en cette conjoncture est d'environ 4 g p. 100 g de composés pectiques, ce que nous nous croyons en droit de considérer comme pratiquement insignifiant.

TABLEAU VI

Composition des aliments ingérés et coefficients de digestibilité des constituants de ces aliments

La deuxième des lignes de ce tableau correspond aux coefficients de digestibilité mesurés au cours des expériences

N° de l'essai	Aliments distribués	Mat. organ.	Mat. azotées	Mat. grasses	Cell. vraie	Lignine insol.	Cell. Weende	Lignine sol.	Lignine dosée	Lignine corrigée	Pentosanes	Glucides et indénines (par différence)	Composés pectiques	Glucides en glucose expt. en glucose	Glucides hydrolysables	Mat. tern. déf.	(M. T. D.)	Lignine dose	M. T. D. × 100
1 B	Foin de luzerne N° 70	933	150	46	261	127	388	39	156	167	99	152	48	107,5	226	727		21,4	
2 B	Foin de luzerne N° 146	59,5	72	46	59	29	49	55	34	174	46	84,5	73,5	—	62	57,5		21,3	
3 B	Foin de luzerne	935	144	31	309	89	308	73	162		125	107	45	70,5	217	760			
4 B	Pulpe de betterave N° 93	59	72	32	60	2	47	75	35		60	78,5	71		57	58			
5 B	Son de blé N° 107 - N° 136	931	158	36	221	128	349	3	131	140	113	195	68	93,0	285	737		17,8	
6 B	Foin avec pulpe 129 % de pulpe	60	70	22	54	49	41	39	39	46	55	73,0	79	259,0	352	768		5,6	
7 B	Foin avec son de blé (25 % de son)	938	89	35	199	25	224	18	43	67	163	289	71	344,0	82	708		8,6	
8 B	Foin avec son de blé (52 % de son)	79,5	16	10	78	16	71	63	39	116	72	91	82		82	80			
9 B	Foin avec pulpe et son de blé	933	146	57	89	39	128	24	63,5	103	207	341	26	79,5	577	708		14,7	
1 M	Foin de luzerne N° 139	66,5	20,5	36	245	70	315	38	108		125	193	54		228	733			
2 M	Foin de luzerne N° 309	931	149	40	197	97	294	—	97	104	139	261	41	215,0	376	742			
3 M	Foin de luzerne N° 837	63	72,5	37	54,5	26	45	—	13		62	80,5	64		73	61,5			
4 M	Foin de luzerne N° 53	932	155	48	151	80	231	16	96	97	161	215	39	270,0	455	729			
5 M	Foin de luzerne N° 259	65	75,5	47,5	55	29	40	29	29	97	67	81	64	169,0	361	761			
		933	133	39	173	58	231	33	31	97	172	274	45		82	730			
		72,5	75,5	55,5	67	23	56	42	30		79	88	71		82				
B. — Expériences sur moutons																			
1 M	Foin de luzerne N° 139	904	242	38	182	60	251	97	166	178	91	101	72	75	189	624		26,6	
2 M	Foin de luzerne N° 309	60	78,5	45	48	27,5	42,5	40	35		50,5	76	77		70,5	53,5			
3 M	Foin de luzerne N° 837	906	206	19	187	136	330	7	143	153	117	150	74	46	189	681			
4 M	Foin de luzerne N° 53	59	78	7	61	39	62	7	29,5		66	73,5	76		70	57,5			
5 M	Foin de luzerne N° 259	915	185	30	241	56	284	84	140	150	117	134	58	32	173	700			
		57	69	24	52,5	—	39	30	18	165	55	78	79	64	162	54,5			
		908	211	38	202	65	287	89	154	101	77	154	61	86	162	659			
		61	74	37,5	53,5	31	46	35	33		50	87,5	79		69	57,5			
		865	181	08	172	72	244	22	94	101	81	166	76		190	586			
		59,5	68	68,5	49	6	35	30	13		54	78	79		66	55,5			

TABEAU VI (suite et fin)

N° de l'essai	Aliments distribués	Mat. organ.	Mat. azotées	Mat. grasses	Cell. vaine	Lignine insol.	Cell. Weende	Lignine sol.	Lignine dosée	Lignine corrigée	Pento- sanes	Glucides et indéterminés (par différence)	Composés pectiques	Glucides corrigés exprimés en glucose	Glucides hydrolysables	Mat. tern. dégr.	(M. T. D.)	Lignine dosée M. T. D. x 100
6 M	Foin de luzerne N° 273	902	170	81	201	98	299	21	119	127	96	150	68	82	202	651		18,3
7 M	Foin de luzerne N° 274	58	69,5	68,5	47	20	38	24	23	108	51	78,5	79	109	63	54		17,2
8 M	Foin de luzerne N° 278	65,5	73	71,5	52	24	43	37,5	26	134	55	85	79	61	71	61		17,8
9 M	Foin de luzerne N° 867	66,5	73	35	54,5	27	40,5	—	11	164	59	85	79	61	66	703		17,8
10 M	Foin de luzerne N° 999	938	152	36	284	145	429	8	153	164	103	153	46	67	189	750		20,4
11 M	Foin de luzerne N° 257	887	182	81	155	76	231	14	90	96	80	212	81	100	204	624		14,4
12 M	Pulpe de betterave N° 127	935	97	35	49	7	35	35	11,5	91	53,5	84	79	100	67	60		10,6
13 M	Marc de pomme	77	38	45	79,5	—	73	29	14	210	91	98	89	143	388	81		21,9
14 M	Paille de blé	983	48	37	172	107	279	89	196	160	217	99	245	104	348	847		17,7
15 M	Foin avec son de blé (12,5 % de son)	59,5	52	43	309	91	400	59	150	160	217	122	39	104	348	847		17,7
16 M	Foin avec son de blé (20,4 % de son)	60	51	18	62	29	61	—	17	154	62,5	60	60	142	64	53,5		19,6
17 M	Foin avec son de blé (29 % de son)	63,5	157	35	234	102	336	42	144	137	126	172	50	154	291	736		17,7
18 M	Foin avec pulpe (33 % de pulpe)	920	161	45	54,5	46	52	—	19,5	146	64,5	86,5	72	151	72,5	58		18,8
19 M	Foin avec pulpe (44 % de pulpe)	920	161	34	215	96	311	40	136	146	117	102	55	151	291	725		18,8
1 P	Aliment composé N° 530	969	110	25	81	16	104	23	49	42	113	57,3	25	509	638	834		4,8
2 P	Aliment composé N° 524	83	71,5	56	55,5	49	58	37,5	42	63	67,5	98	50	450	92	85,5		7,9
3 P	Aliment composé N° 474	953	169	37	26	36	89	23	59	106	102	490	26	450	567	747		13,7

C. — Expériences avec porcs.

1 P	Aliment composé N° 530	969	110	25	81	16	104	23	49	42	113	57,3	25	509	638	834		4,8
2 P	Aliment composé N° 524	83	71,5	56	55,5	49	58	37,5	42	63	67,5	98	50	450	92	85,5		7,9
3 P	Aliment composé N° 474	953	169	37	26	36	89	23	59	106	102	490	26	450	567	747		13,7

et, d'autre part, les corps pectiques et les matières azotées, apparaissent hautement digestibles, les pentosanes et la cellulose vraie sont moins facilement attaquables par les ferments microbiens de l'appareil digestif des animaux, ce qui s'explique aisément (voir les données du tableau VII). Quant au coefficient de digestibilité de la lignine, qui est le plus faible de tous, nous constatons qu'il se maintient assez régulièrement autour de 30 p. 100. Le sort de la fraction de ce complexe qui paraît franchir la barrière intestinale pose des problèmes d'un grand intérêt qui n'ont pas encore été résolus jusqu'à ce jour.

Une mention spéciale doit être réservée à la digestibilité des matières grasses. Pour cette catégorie de substances, le coefficient d'utilisation digestive obtenu par l'expérience ne correspond pas exactement à la partie des lipides ingérés retenue par l'organisme animal, car nous savons que les déchets des sécrétions glandulaires et de la paroi intestinale viennent enrichir en matières solubles dans l'alcool et l'éther les résidus des aliments ingérés. Telle est la raison principale pour laquelle ce coefficient apparaît anormalement bas, lorsqu'on le compare à celui des protides et des glucides.

TABLEAU VII

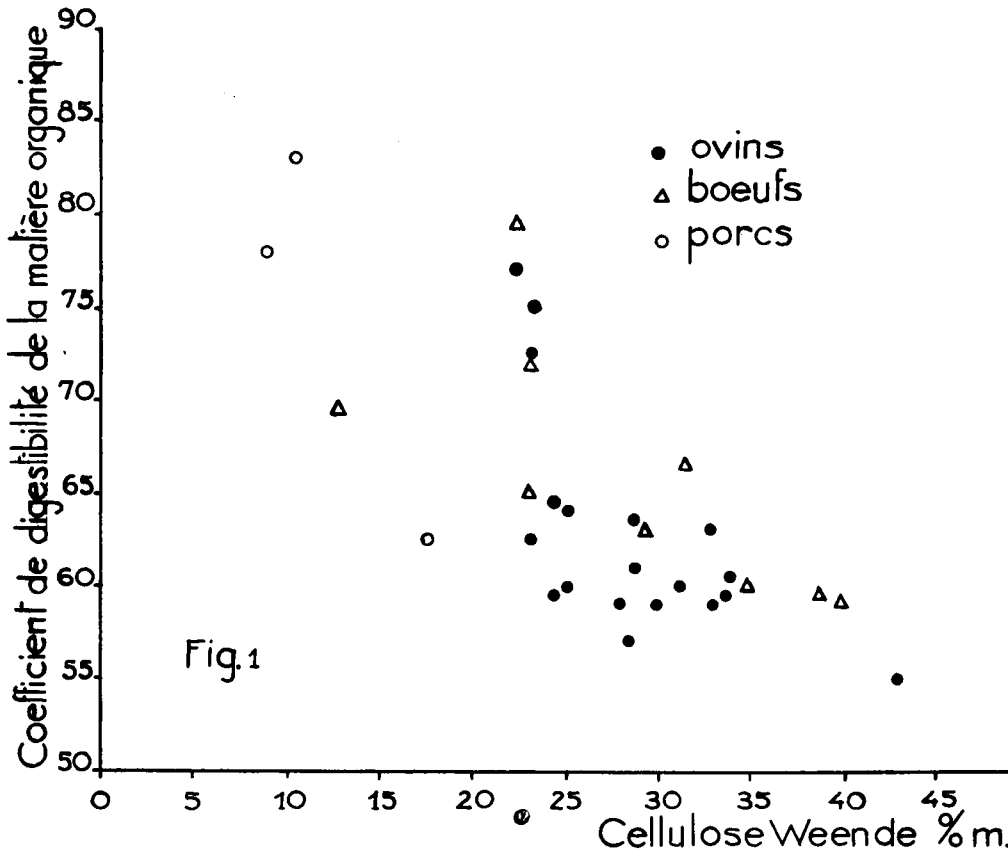
Ordres de grandeur comparés des coefficients de digestibilité des divers groupes de substances identifiés par l'analyse (moyennes des données du tableau VI)

	Coefficients moyens de digestibilité
Glucides en C ₆	83,5
Composés pectiques	73,0
Matières azotées	72,5
Pentosanes.....	63,1
Cellulose vraie	50,7
Matières grasses	43,7
Lignine	30,1

Nous savons qu'il existe une certaine relation entre la teneur en cellulose WEENDE d'un aliment et la digestibilité de sa matière organique. Pour vérifier ce fait, avec les données recueillies par nos soins, nous avons construit la figure 1, obtenue en portant en abscisses les teneurs en cellulose WEENDE des aliments ou combinaisons d'aliments mentionnés au tableau VI, et en ordonnées, les coefficients de digestibilité pour la matière organique correspondants. L'extrême dispersion des points obtenus montre qu'il n'est pas possible, sous peine de commettre de grossières erreurs, de prévoir la digestibilité d'un aliment avec la seule aide de la teneur en cellulose WEENDE fournie par l'analyse. La valeur du coefficient de corrélation qui lie la digestibilité de la matière organique au taux de cellulose WEENDE est égale ici à $-0,73 \mp 0,06$.

Devant ce résultat, nous avons eu l'idée de comparer le taux de lignine dosée par la méthode précédemment décrite à la somme des substances ternaires délipidées, c'est-à-dire à la somme de la cellulose WEENDE et des extractifs non azotés (ou à la différence entre le taux de matière organique et la somme matières azotées + matière grasse) telle qu'elle est fournie par les analyses

courantes. Le coefficient de corrélation qui lie la digestibilité de la matière organique au rapport $\frac{\text{lignine}}{\text{M. T. D.}}$ est égal à $-0,89 \mp 0,03$. Cette corrélation est donc très nettement supérieure à la précédente et montre que la méthode proposée doit permettre une meilleure évaluation de la digestibilité à partir des données de l'analyse. Dans ce but nous avons calculé l'équation de la courbe



représentative du phénomène. L'ajustement à la droite nous a conduit à l'équation suivante

$$y = -1,20 x + 83,8$$

La somme des carrés des écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées est égale à 388,9

L'ajustement à une hyperbole conduit à l'équation

$$y = + \frac{167}{x} + 52$$

La somme des carrés des écarts n'est dans ce cas que de 318,2. Nous avons donc choisi ce dernier ajustement.

Voici, indiquée dans le tableau VIII, quelle est, pour chaque expérience, la différence entre la digestibilité de la matière organique, évaluée à l'aide du graphique de la figure 2, et la digestibilité correspondante fournie par l'expérimentation directe.

TABLEAU VIII

Ecarts entre les coefficients de digestibilité évalués par la méthode à la lignine et les coefficients correspondants mesurés expérimentalement.

N° de l'essai	Coefficient de digestibilité de la matière organique		Différence en valeur absolue
	mesuré expérimentalement	mesuré par la méth. à la lignine	
1 B	59,5	59,8	0,30
2 B	59,0	59,85	0,85
3 B	60,0	61,4	1,40
4 B	79,5	81,85	2,35
5 B	69,5	71,4	1,90
6 B	66,5	63,4	3,10
7 B	63,0	64,75	1,75
8 B	65,0	64,65	0,35
9 B	72,0	65,9	6,10
1 M	60,0	58,3	1,70
2 M	59,0	59,95	0,95
3 M	57,5	60,35	2,85
4 M	61,0	59,15	1,85
5 M	59,5	62,4	2,90
6 M	58,0	61,1	3,10
7 M	64,5	61,7	2,80
8 M	60,5	61,4	0,90
9 M	55,0	60,2	5,20
10 M	62,5	63,6	1,10
11 M	77,0	67,8	9,20
12 M	59,0	59,6	0,60
14 M	59,5	60,5	1,00
15 M	60,0	60,9	0,90
16 M	63,5	61,4	2,90
17 M	64,0	62,8	1,20
18 M	75,0	68,6	6,40
19 M	63,0	60,7	2,30
1 P	83,0	87,6	4,60
2 P	78,0	73,2	4,80
3 P	62,5	64,2	1,70

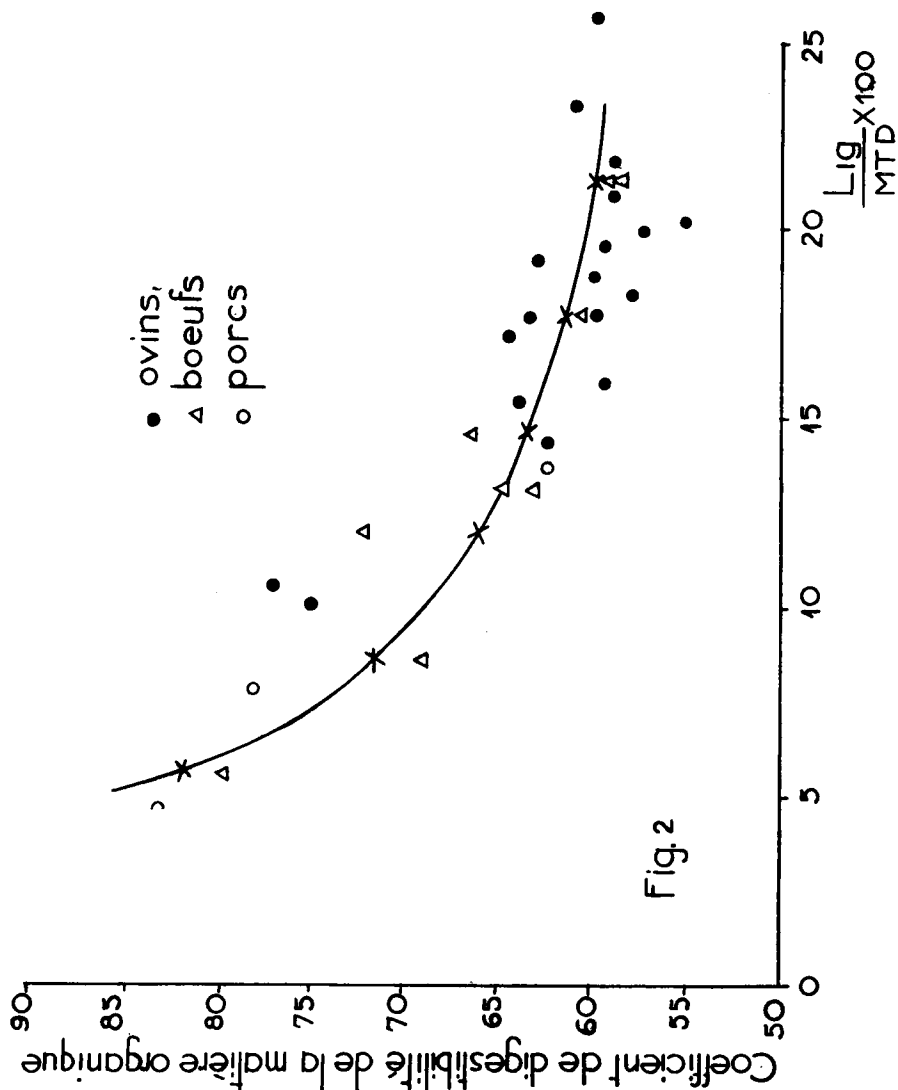
Moyenne de la différence % : 3,93

Remarquons que le degré d'approximation de la digestibilité mesurée d'après cette méthode est sensiblement du même ordre que les différences observées normalement entre les coefficients de digestibilité de la matière organique mesurés expérimentalement.

La courbe s'applique aussi bien aux bovins qu'aux ovins et aux porcins. Elle est toutefois limitée dans le cadre de cette étude, aux valeurs du rapport

$\frac{\text{lignine}}{\text{M. T. D.}}$ comprises entre 4,7 et 26,6.

Nous n'avons pas fait figurer sur notre tableau les résultats de l'expérience n° 13, effectuée avec de la paille de blé. La paille semble se comporter d'une façon différente de celle des autres aliments, pour des raisons qui nous échappent et que des essais ultérieurs devraient permettre de préciser.



Il convient de remarquer que les points de la figure 2 qui sont situés au-dessus de la courbe et les plus éloignés correspondent à la pulpe de betterave et aux mélanges en contenant. Or, pour ces aliments, le rapport $\frac{\text{lignine soluble}}{\text{lignine totale}}$ est particulièrement élevé. Inversement les points représentatifs situés au-dessous de la courbe correspondent à des valeurs particulièrement faibles. On

peut imaginer une correction basée sur la valeur du rapport du taux de lignine soluble dans la soude à 1,25 % au taux de lignine totale. Nous étudions actuellement cette correction.

CONCLUSIONS

En résumé, la nouvelle méthode d'analyse des aliments du bétail que nous préconisons présente l'avantage de séparer les matières analysées en groupes mieux définis chimiquement que ceux de la méthode classique utilisée jusqu'à ce jour. En particulier, la lignine, les corps pectiques et les divers glucides sont dosés systématiquement, et les proportions relatives de ces corps permettent d'apprécier avec une assez bonne approximation la digestibilité de l'aliment sans qu'il soit nécessaire d'effectuer la détermination expérimentale de cette dernière. A ce point de vue, la méthode décrite ci-dessus représente un progrès indéniable par rapport à l'ancien procédé basé essentiellement sur le dosage de la cellulose WEENDE.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Prélèvements et analyses des échantillons d'aliments et produits destinés à l'alimentation des animaux. Communication de l'Institut Professionnel de Contrôle et de Recherches Scientifiques des Industries de l'Alimentation Animale, 1, rue Santos-Dumont, Paris 1951.
- (2) LEROY (A. M.), FRANÇOIS (A.). — Le dosage des acides gras fixes et des substances insaponifiables des tissus végétaux. Étude de la composition des aliments des animaux. *Annales de Zootechnie*, **1**, p. 51-59, 1952.
- (3) FRANÇOIS (A.). — Erreur commise dans le calcul de la valeur fourragère d'un aliment composé en fonction des erreurs de l'analyse chimique. *Annales Agronomiques*, **19**, p. 452, 465, 1949.
- (4) KURSCHNER (K.), HOFFER (A.). — A new process for the determination of cellulose in wood and pulp. *Tech. chem. Paper Zellstoff Fab.*, **26**, p. 125, 139, 1929 ; **31**, p. 14, 1934.
- (5) BERTRAND (G.). — Composition et méthode d'analyse des tissus végétaux lignifiés. *Annales des fermentations*, **1**, p. 577, 595, 1935.
- (6) MAHOOD (J. A.), CABLE (O. F.). — Chemistry of wood IV. Analysis of Eucalyptus Globules and Pinus Monticola. *J. Ind. Eng. Chem.*, **14**, p. 933, 1922.
- (7) FRANÇOIS (A.), LEROY (A. M.), LERY (G.). — Le sort des radicaux methoxy au cours de la digestion des pectines et des lignines par les bovins. *C. R. Ac. Sc.*, **232**, p. 1323, 1325, 1951.
- (8) UNGER (E.), JAGER (R.). — Ueber Pentosanbestimmungen. *Ber.*, **36**, p. 1222, 1903.
- (9) GUILLEMET (R.), JACQUOT (R.). — Essai de détermination de l'indigestible glucidique. *C. R. Ac. Sc.*, **216**, p. 508-510, 1943.
GUILLEMET (R.), PRECEPTIS (P.). — Le dosage de la cellulose par dissolution formique de l'amidon et des protéides. *C. R. Ac. Agr.*, **28**, p. 383, 1942.
- (10) LEROY (A. M.), MICHAUX (A.). — L'utilisation des matières pectiques par l'organisme animal. *C. R. Ac. Sc.*, **229**, p. 1034-1036, 1949.
- (11) MICHAUX (A.). — Les substances réductrices d'origine pectique au cours de la digestion chez les ruminants. *C. R. Ac. Sc.*, **230**, p. 2051-2053, 1950.
- (12) MICHAUX (A.). — Les substances fondamentales de la membrane cellulaire végétale au cours de la digestion chez la brebis. *C. R. Ac. Sc.*, **232**, p. 121-123, 1951.