

Les aliments

Les aliments apportent aux animaux les substances nutritives dont ils ont besoin. Un aliment unique est généralement incapable de faire face, seul, à l'ensemble des besoins. C'est la raison pour laquelle plusieurs aliments sont associés au sein d'une ration.

1. Les constituants des aliments

Tous les aliments sont constitués des mêmes composants : eau, matières minérales, glucides, lipides et matières azotées (cf. tab. 2.1).

Par dessiccation de l'aliment, on obtient un résidu sec appelé matière sèche (MS) :

quantité d'eau évaporée = masse avant dessiccation – MS.

La matière sèche calcinée laisse un résidu appelé cendres ou matières minérales (MM) ; la masse qui a disparu lors de la calcination est appelée matière organique (MO). On calcule :

$$MO = MS - MM.$$

Les composants de la matière organique sont des glucides, des lipides et des matières azotées.

Tableau 2.1. Les différents constituants des aliments

		Eau		H ₂ O	
		Matière minérale		Macroéléments	
Matière brute	Matière sèche			Chlore, phosphore, soufre Calcium, sodium, magnésium Potassium	
				Oligoéléments	
		Matière organique	Glucides	Glucides cytoplasmiques	Fer, cuivre, zinc, cobalt Manganèse, iode, sélénium, etc.
				Glucides pariétaux des végétaux	Pentoses Hexoses (glucose, fructose, etc.) Saccharose, maltose, lactose Mélibiose Fructosanes Amidon, etc.
			Lipides	Lipides	Cellulose, hémicellulose Substances pectiques (Lignine) Glycérides Stérides Cérides
		Matières azotées	Matières azotées protidiques		Acides aminés libres Combinaisons d'acides aminés (peptides, polypeptides, protéines)
			Matières azotées non protidiques		Amides (urée, etc.) Amines Ammoniaque Bases azotées

1.1. Les constituants glucidiques

On distingue deux grandes catégories de glucides selon leur localisation dans la cellule végétale : les glucides cytoplasmiques ou intracellulaires et les glucides pariétaux (cf. tab. 2.2).

Tableau 2.2. Principaux glucides cytoplasmiques et constituants pariétaux d'une cellule végétale

Localisation	Dénomination		Unités constitutives
Contenu cellulaire	Sucres libres	Glucose Fructose Saccharose Mélibiose	Glucose, fructose Glucose, galactose
	Polyosides de réserve	Fructosanes Amidon	Fructose Glucose
Parois	Polyosides	Cellulose	Glucose
		Hémicelluloses	Xylose Arabinose Galactose Mannose Glucose Acide glucuronique
	Substances pectiques		Acide galacturonique Arabinose Galactose
	Substances non glucidiques	Lignine	Alcool coumarylique Alcool coniférylique Alcool synapylique
		Cires (cutine)	Alcools et acides gras à longue chaîne

(Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants, INRA, 1981)

1.1.1. Les glucides intracellulaires

Les glucides intracellulaires sont constitués des sucres hydrosolubles, des grains d'amidon et des fructanes. Les *mannanes hydrosolubles* représentent en général moins de 10% de la matière sèche des aliments d'origine végétale. À l'exception de quelques graminées (ou poacées) jeunes, des berraves et de la mûse qui sont beaucoup plus riches. La concentration maximale est atteinte avant le début de l'épuration des graminées et peu avant le début du bourgeonnement des légumineuses (ou fabacées). Les *amido* ne sont abondants que dans les grains, les tubercules et leurs sous-produits. Ils sont mis en réserve dans les plastes des cellules végétales (amiloplastres). Les *fructanes* s'accumulent à la base des tiges des graminées.

L'amidon est un solide blanc, insoluble dans l'eau. L'hydrolyse ménagée (expérience de Meyer avec 200 cm³ d'empois d'amidon et 5 cm³ d'HCl) donne deux fractions :
 - l'amylopectine (70 à 80% du poids moléculaire de l'amidon), chaîne ramifiée de maltose et d'isomaltose (se colore en violet en présence d'eau iodée) ;
 - l'amylose (20 à 30% du poids moléculaire), chaîne de 1 000 à 4 000 glucopyranoses en hélice (se colore en bleu en présence d'eau iodée).

Chez l'animal, l'amidon est hydrolysé par une amylase. Sa forme ramifiée permet l'attaque des enzymes hydrolytiques en plusieurs points.

1.1.2. Les glucides parietaux

Les glucides parietaux sont les constituants des parois cellulaires. On distingue les glucides proprement dits (polysides) et les constituants non glucidiques qui leur sont associés (lignine). On dénombre trois groupes de polysides : la cellulose, les hémicelluloses et les substances pectiques.

La CELLULOSE est formée de longues chaînes de molécules de glucose dont les liaisons osidiques ne peuvent être rompues, au cours de la digestion, que par les enzymes bactériennes. Elle est le principal constituant de la paroi secondaire des cellules végétales, des tissus de soutien et des vaisseaux du bois (xylème). Elle est formée de chaînes de β -D-glucopyranose toutes reliées entre elles par des liaisons hydrogène (liaisons faibles).
 Les HÉMICELLULOSES, formées essentiellement de chaînes de pentoses, sont les principaux constituants de la paroi primaire des cellules végétales. Elles sont souvent associées à la lignine et, par conséquent, sont moins digestibles que la cellulose vraie.

LES SUBSTANCES PECTIQUES, chaînes d'acide uronique, se rencontrent surtout dans les lamelles moyennes des cellules. Ce sont des constituants très digestibles.
 LA LIGNINE, formée d'alcobols, augmente progressivement les fibres polyosidiques des tissus de soutien et des vaisseaux ligneux. La lignification est d'autant plus importante que le végétal est plus âgé. La lignine est une substance totalement indigestible ; elle rend inaccessible à l'action microbienne les polysides parcellaires cellulose et hémicelluloses, auxquels elle s'associe. La teneur en lignine est donc le principal facteur de variation de la digestibilité des aliments d'origine végétale.

1.2. Les constituants azotés

La quantité de matières azotées totales (MAT) est calculée à partir du résultat du dosage de l'azote (G.F. 1-4-3).
 Les constituants azotés sont surtout présents dans le cytoplasme des cellules ; ils font l'objet d'une classification fondée sur leur nature chimique et leur solubilité (cf. tab. 2.3).

Tableau 2.3. Classification des matières azotées

Matières azotées totales (*)		Classification	
		Chimique	Selon la solubilité
Matières azotées totales (*)	Protéines (de plus de 100 AA) - hétéroprotéines - holoprotéines Polypeptides complexes (de 10 à plus de 100 AA) Acides aminés (**) Bases azotées (formes cycliques, constituants des acides nucléiques) Amines, amides Formes azotées simples (NO^2 , NO^3 , NH_4)	Matière azotée protidiques	Matière azotée protéiques ou protéiques
		Matière azotée non protidiques	Matière azotée non protéiques ou non protéiques

(*) Le terme de protéines brutes, qui figure sur les étiquettes d'aliments du bétail, est équivalent.

(**) Les acides aminés sont au nombre de vingt : glycocelle, alanine, sérine, thréonine, valine, leucine, isoleucine, acide aspartique, acide glutamique, acide hydroxyglutamique, arginine, lysine, cystine, méthionine, phénylalanine, tyrosine, tryptophane, histidine, proline, hydroxyproline.

(Alimentation des boeufs, INRA (IFR, 1984)

1.2.1. La classification chimique

Les matières azotées protidiques donnent par hydrolyse des acides aminés. Elles comportent les protéines, les peptides (oligopeptides, de deux à dix acides aminés, et polypeptides) et les acides aminés libres.

Les matières azotées non protidiques ne sont pas constituées d'acides aminés. Ce sont les amines, les amides (urée), les formes azotées simples (NO^2 , NO^3 , NH_4) et les bases azotées des acides nucléiques.

1.2.2. La classification selon la solubilité

Les solvants utilisés sont l'éthanol à 80% ou l'acide trichloracétique à 10%.

Les matières azotées non protéiques sont solubles dans ces solvants. Lorsqu'elles sont dans les vacuoles des cellules, elles sont donc rapidement accessibles lors de la digestion; une teneur élevée en matières azotées non protéiques reflète l'intensité de la protéolyse réalisée dans certains aliments comme les ensilages.

Les matières azotées protéiques non solubilisées dans les solvants ci-dessus sont constituées essentiellement de protéines.

1.3. Les constituants lipidiques

Chez les végétaux, les constituants lipidiques sont localisés dans les chloroplastes des cellules, les germes des grains, la cuticule des feuilles. Ce sont en général des triglycérides, c'est-à-dire des esters d'acides gras (AG) et de glycérol.

Une matière grasse est caractérisée par les différents acides gras qui la composent. Les acides gras sont classés en fonction :

- du nombre d'atomes de carbone : AG courts ou volatils (C1 à C4), AG moyens (C6 à C14), AG longs (C16 à C22);
- du nombre de doubles liaisons dans leur chaîne carbonée, c'est-à-dire du degré d'insaturation.

Les acides gras saturés ne possèdent que des simples liaisons. Ils ont pour formule générale $\text{C}_n(\text{H}_{2n})\text{COOH}$. Il s'agit par exemple de l'acide stéarique ($\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$).

Leur point de fusion augmente avec le nombre d'atomes de carbone.

Les acides gras insaturés comportent une ou plusieurs doubles liaisons :

- une double liaison (acide mono-insaturé) comme l'acide oléique $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$;
 - deux doubles liaisons comme l'acide linoléique $\text{C}_{17}\text{H}_{31}\text{COOH}$;
 - trois doubles liaisons comme l'acide linoléique $\text{C}_{17}\text{H}_{29}\text{COOH}$;
- Le point de fusion diminue avec le nombre de doubles liaisons.

1.4. L'analyse des aliments

L'analyse classique, dite fourragère, correspond à un ensemble de dosages simples universellement reconnus et appliqués; elle constitue un compromis entre la précision de l'information recherchée et le coût. On détermine les teneurs en eau et en matière sèche, en matières minérales, en matières azotées, en matières grasses et en cellulose brute. Une fraction non dosée, l'extractif non azoté (ENA), peut être calculée par différence :

$$\text{ENA} = \text{MO} - (\text{MAT} + \text{MG} + \text{CB}).$$

L'ENA inclut les glucides intracellulaires, l'amidon en particulier, et souvent plus de la moitié des constituants pariétaux. Il englobe des glucides à valeur alimentaire très variable et n'a pas véritablement de signification nutritionnelle.

1.4.1. La teneur en eau

La teneur en eau d'un aliment est, par convention, la perte de masse qu'il subit en étant maintenu pendant quatre heures dans une étuve à $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.4.2. La teneur en matières minérales

La teneur en matières minérales (ou cendres brutes) est le résidu obtenu après calcination de l'aliment dans un four à $550 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, pendant six heures. Elle permet de calculer la teneur en matière organique (MO) :

$$\text{MO} = \text{MS} - \text{MM}.$$

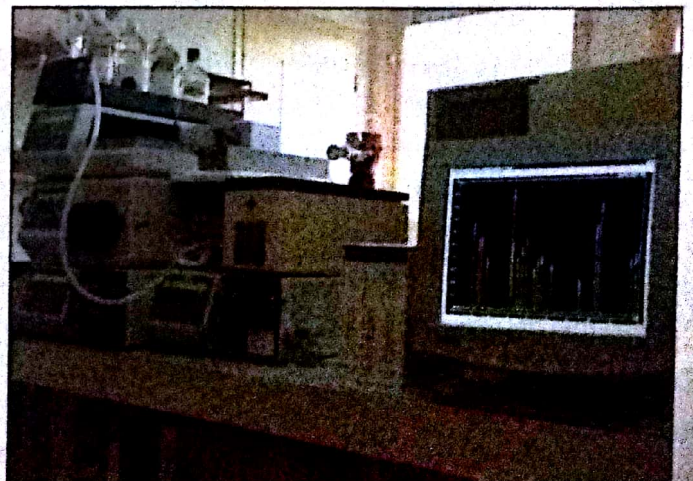
On procède à des dosages spécifiques complémentaires pour connaître la teneur en éléments minéraux : Ca, P, Mg, Na, etc.

Pour estimer la quantité de terre présente dans un aliment, on détermine l'insoluble chlorhydrique, résidu siliceux obtenu après l'action d'acide chlorhydrique sur les cendres brutes.

1.4.3. La teneur en matières azotées totales

La teneur en matières azotées totales (ou protéines brutes) résulte du dosage de l'azote total par la méthode de Kjeldahl. L'azote organique de l'aliment est minéralisé par l'acide sulfurique sous forme de sulfate d'ammonium. L'ammoniac, déplacé par la soude, est dosé en retour. On en déduit la teneur de l'échantillon en azote.

Le taux de matières azotées totales (MAT) est obtenu, par convention, en multipliant la teneur en azote N par 6,25. Le coefficient $6,25 = 100/16$ suppose que les matières azotées analysées contiennent, en moyenne, 16% d'azote. En réalité, les acides aminés en contiennent 8 à 32%, l'urée 46% et l'ammoniac 82%. Les matières azotées ainsi déterminées regroupent des substances azotées de natures différentes, n'ayant pas la même signification alimentaire.



Appareil de dosage d'acides aminés

1.4.4. Les matières grasses brutes

Les matières grasses brutes (MGB), ou extrait étheré, correspondent aux substances extraites par un solvant, l'éther éthylique ou l'hexane. Cet extrait étheré ne contient pas tous les lipides, mais renferme des substances non lipidiques solubles dans les graisses, comme les pigments. Pour cette raison, la détermination des matières grasses n'est pas réalisée dans les fourrages riches en pigments. Des analyses spécifiques permettent de connaître la composition en acides gras et leur degré de saturation. Les lipides ne représentent qu'une faible fraction de la matière sèche des fourrages (2 à 5%).

1.4.5. Les constituants pariétaux

Les constituants pariétaux peuvent être dosés selon plusieurs méthodes. Les résultats de ces dosages permettent de prévoir la digestibilité de la matière organique, avec une précision variable selon la méthode d'analyse retenue.

► La méthode de Weende

La cellulose brute (CB), ou matières cellulosiques, est le résidu organique obtenu après une double hydrolyse, acide puis basique. La cellulose brute est constituée par la majeure partie de la cellulose, une fraction plus ou moins importante de la lignine, ainsi que par une petite partie des hémicelluloses et même par des matières azotées. La cellulose brute ne représente donc pas une substance chimique précise. Pour un végétal donné, les relations entre les variations des teneurs en cellulose brute et en parois et lignine sont constantes. De ce fait, la teneur en cellulose brute est un bon critère prédictif de la digestibilité de la matière organique et de la valeur énergétique.

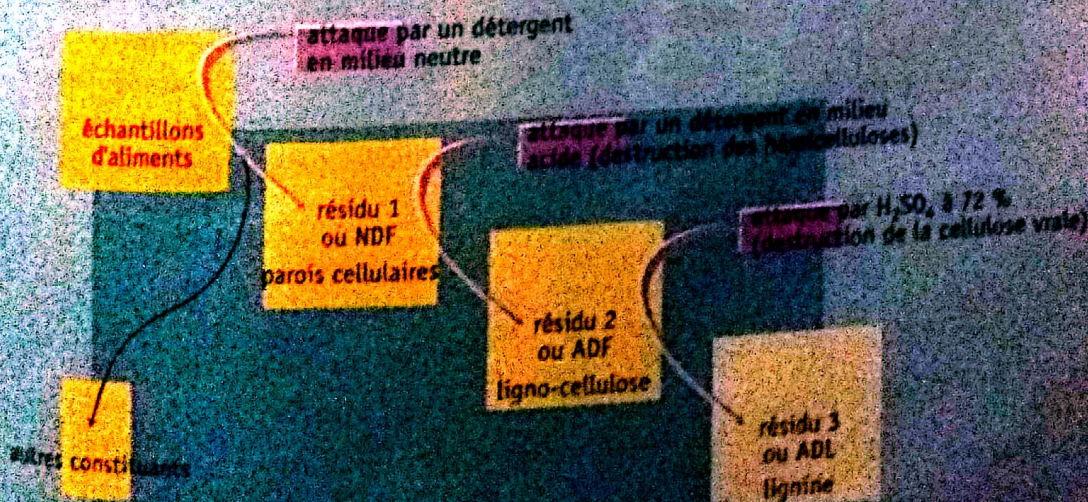
La méthode de Van Soest

Il s'agit d'une méthode d'analyse par fractionnement des différents constituants de la paroi végétale. Elle repose sur l'utilisation de détergents (cf. fig. 2.1) et permet de quantifier trois résidus :

- le résidu 1 « parois cellulaires » ou NDF (*neutral detergent fiber*) contient la majeure partie des parois, mais il comprend aussi des matières azotées et de l'amidon ;
- le résidu 2 « lignocellulose » ou ADF (*acid detergent fiber*) peut encore contenir des matières azotées et des tannins. Il correspond à une estimation de l'ensemble (lignine et cellulose) ;
- le résidu 3 « lignine » ou ADL peut aussi contenir des matières azotées et des tannins.

Comme la teneur en cellulose brute, ces critères sont donc imparfaits, mais leur utilisation permet tout de même d'améliorer la précision de l'estimation de la digestibilité de la matière organique des aliments (1% de lignine supplémentaire accroît en moyenne de 3,8% la quantité de parois non digérées).

Figure 2.1. Fractionnement des glucides pariétaux par la méthode de Van Soest



Les méthodes microbiologiques et enzymatiques

Elles visent à reproduire en laboratoire les phénomènes intervenant au cours de la digestion.

POUR LES ALIMENTS DES RUMINANTS, les méthodes microbiologiques (digestibilité in vitro, digestibilité en sachets de nylon) et la méthode enzymatique (cellulase ou pepsine-cellulase) estiment la dégradabilité des parois dans le rumen. Les méthodes microbiologiques donnent des résultats plus précis que les méthodes chimiques classiques, elles nécessitent cependant l'entretien d'animaux fistulés, à l'inverse de la méthode enzymatique qui donne des résultats aussi précis.

POUR LES ALIMENTS DES PORCS ET DES VOLAILLES, le dosage des parois insolubles dans l'eau (PAR), méthode rapide mise au point par l'INRA, donne de très bons résultats pour la prévision des caractéristiques nutritives, la valeur énergétique notamment. Il est encore nécessaire d'affiner sa reproductibilité.

En bref...

Les aliments sont constitués d'eau et de matière sèche (MS) ; celle-ci contient de la matière organique (MO) et des matières minérales (MM).

Parmi les constituants de la matière organique, les plus importants sont :

- les constituants glucidiques, qui comportent deux grandes catégories :

- les glucides cytoplasmiques : sucres, amidon,
- les glucides pariétaux : cellulose, hémicelluloses, substances pectiques plus ou moins incrustées de lignine.

La cellulose brute (CB) dosée par la méthode de Weende est un bon indicateur de la digestibilité de la matière organique.

- les constituants azotés, parmi lesquels on distingue :

- les matières azotées protidiques : protéines, polypeptides, acides aminés,
- les matières azotées non protidiques : bases azotées, amines, amides dont l'urée.

La quantité de matières azotées totales (MAT) ou protéines brutes d'un aliment est obtenue conventionnellement à partir du résultat du dosage de l'azote par la méthode de Kjeldahl : $MAT = N \times 6,25$.