ALGERIE

LA CRISE DU LAIT, LE FOURRAGE ET L'ALIMENTATION DE LA VACHE LAITIERE

EL-HADI BOUABDALLAH

Janvier 2023

Je dédie ce livre à **Kadi Si Amma**r

Cet étudiant que je ne connais pas,
que je n'ai jamais vu
et que je ne rencontrerai peut-être jamais
qui a écrit dans son mémoire de Magistère traitant de l'élevage bovin laitier
en Algérie

«…Trois systèmes d'alimentation sont identifiés :
le système «hors sol»,
le système «concentré + fourrage»
et le système «classique», «fourrage + concentré».
Ce dernier, base de toute production laitière, est le moins représenté …»

SOMMAIRE

- Une petite histoire pour commencer
- Avant-propos : à qui est destiné ce livre et dans quel but il a été rédigé ?
- Pour les spécialistes et les lecteurs au fait de l'agronomie et de l'élevage

PREMIERE PARTIE

LES FOURRAGES ET LA DIGESTION DES RUMINANTS

Chapitre I : Les aliments pour les vaches laitières et leur disponibilité en Algérie

1. Les fourrages
2. Les racines et tubercules
3. Les aliments concentrés

Chapitre II : La production laitière dans le monde et en Algérie

1. Évolution et mutation de la production laitière dans le monde et en Algérie
2. Disponibilité limitée de l'alimentation qui freine la production laitière en Algérie

Chapitre III : Le fourrage

1. Le fourrage est une plante : que contient-il ?
2. Chez les plantes tout commence par la photosynthèse
3. Le complexe feuille-tige-racine
4. La cellule végétale et la paroi pecto-cellulosique
5. Application au fourrage
6. Les nutriments des fourrages
7. Les glucides
8. Les matières azotées
9. Les lipides
10. Les matières minérales
11. Récapitulation

Chapitre IV : Le système digestif et la digestion des aliments chez la vache laitière

1. Anatomie du tube digestif de la vache laitière
2. Le rumen est une poche habitée par des milliards de micro-organismes
3. Les micro-organismes du rumen ne respirent pas : ils fermentent
4. Importance des micro-organismes du rumen dans la digestion chez la vache laitière
5. Pathologie fréquente de la digestion chez la vache laitière en Algérie : l'acidose
6. La digestibilité

DEUXIEME PARTIE

FONDEMENTS THEORIQUES DE L'ALIMENTATION DE LA VACHE LAITIÈRE

Chapitre V : Valeur nutritive d'un fourrage et besoins alimentaires de la vache laitière

1. Fonctions, propriétés et nouvelle formulation de la définition d'un fourrage
2. Expression des besoins de la vache laitière

Chapitre VI : Valeur énergétique. Fondements théoriques du calcul de la teneur en énergie

1. L'énergie d'un fourrage : fondements théoriques
2. Expression pratique de la valeur énergétique d'un fourrage
3. Principe de calcul des besoins en énergie de la vache laitière

Chapitre VII : Valeur protéinique. Fondements théoriques du calcul de la teneur en protéines

1. La matière azotée
2. Les protéines digestibles dans l'intestin (PDI)
3. Principes de calcul de la valeur PDI d'un fourrage
4. Application au calcul de la valeur PDI d'un fourrage

Chapitre VIII : Valeur d'encombrement d'un fourrage et d'un aliment concentré

1. Valeur d'encombrement d'un fourrage (VEF)
2. Valeur d'encombrement d'un aliment concentré (VEC)

Chapitre IX : Capacité d'ingestion d'une vache laitière

1. Définition
2. Calcul de la capacité d'ingestion (CI) d'une vache laitière
3. Prévision de la matière sèche volontairement ingérée (MSVI) par une vache laitière
4. Notion de densité énergétique d'un fourrage

Chapitre X : Les apports en éléments minéraux et vitamines par le fourrage

1. Rôle et fonction des éléments minéraux chez la vache laitière
2. La vache, le lait et les minéraux
3. Combler les besoins de la vache laitière en minéraux
4. Principe de calcul de l'alimentation minérale de la vache laitière
5. Les vitamines

TROISIEME PARTIE

L'ANALYSE FOURRAGERE ET LES EQUATIONS DE PREDICTION

Chapitre XI : L'analyse fourragère

1. Les éléments dosés par l'analyse chimique
2. La matière sèche (MS)
3. La matière minérale (MM)

4. La matière organique (MO)
5. La matière azotée totale (MAT)
6. Les composés pariétaux glucidiques dosés par la mesure de la cellulose brute (CB)

Chapitre XII : Introduction au calcul de la valeur alimentaire des fourrages avec les équations de prédiction

1. Des équations pour prédire la valeur nutritive d'un fourrage
2. Les équations de prédiction et leur adéquation aux fourrages algériens

Chapitre XIII : Les équations de prédiction de la valeur alimentaire d'un fourrage

1. Équations de prédiction de la valeur énergétique
2. Équations de prédiction de la valeur azotée
3. Équations de prédiction de la valeur d'encombrement
4. Equations de prédiction pour un foin ou un ensilage à partir des données du fourrage vert correspondant

QUATRIEME PARTIE

L'APPLICATION DES EQUATIONS DE PREDICTION AU CALCUL DE LA VALEUR ALIMENTAIRE DES FOURRAGES

CHAPITRE XIV : Calcul de la valeur alimentaire du foin et du fourrage vert à partir des données de leur composition chimique et des équations de prédiction

1. Calcul de la valeur alimentaire du «foin de aami Lakhdar»
2. Calcul de la valeur alimentaire d'un fourrage vert naturel composé de graminées poussant à l'état spontané dans la Mitidja
3. Calcul de la valeur alimentaire d'un fourrage de vesce-avoine récolté en vert au stade épiaison
4. Valeur alimentaire d'un fourrage de vesce-avoine récolté en foin

CINQUIEME PARTIE

CALCUL DE LA VALEUR ALIMENTAIRE DES ENSILAGES

Chapitre XV : De l'ensilage à la place du foin

1. Les différentes formes de conservation du fourrage ensilé
2. Les travaux préalables à l'ensilage selon la forme de conservation et le type de fourrage à ensiler
3. Les ensilages à faible niveau de mécanisation

Chapitre XVI : Calcul de la valeur alimentaire des fourrages ensilés à partir des données de leur composition chimique et des équations de prédiction

1. Calcul de la valeur alimentaire d'un ensilage de maïs fourrager à partir d'une analyse effectuée sur fourrage vert avant ensilage
2. Calcul de la valeur alimentaire d'un ensilage de maïs fourrager à partir d'une analyse effectuée sur ensilage

3. Calcul de la valeur alimentaire d'un ensilage de vesce-avoine à partir d'une analyse effectuée sur fourrage vert avant ensilage

Chapitre XVII : Pourquoi n'avons-nous pas une table de la valeur alimentaire de nos fourrages 60 ans après ?

SIXIEME PARTIE

LE CALCUL DE LA RATION ALIMENTAIRE POUR LA VACHE LAITIERE

Chapitre XVIII : Démarches préliminaires au rationnement d'un troupeau laitier

1. Démarches préliminaires à l'établissement d'une ration alimentaire pour les vaches laitières
2. La vache type
3. Calcul de la production laitière type
4. Exemple de « Construction » de la vache type pour un troupeau de 20 vaches avec une production laitière moyenne de 20 litres/vache/jour

Chapitre XIX : Équilibrer une ration alimentaire en production laitière

1. Rappel des caractéristiques de la vache type
2. Données sur les aliments disponibles
3. Calcul de la capacité d'ingestion journalière (CI)
4. Calcul des besoins journaliers en énergie, protéines et minéraux
5. Vérifier si la ration alimentaire couvre les besoins en énergie de la vache
6. Calcul de la ration en ajoutant un concentré pour couvrir la totalité des besoins énergétiques
7. Vérification de l'équilibre de la ration en énergie
8. Vérification de l'équilibre de la ration en protéines
9. Calcul de la ration en équilibrant les protéines
10. Vérification de l'équilibre de la ration finale
11. Calcul du Rmic pour vérifier le bon fonctionnement du rumen permis par la ration et l'équilibre entre protéines et énergie
12. Vérification de l'équilibre de la ration en minéraux

Chapitre XX : Epilogue de «l'histoire de aami Lakhdar» ou comment équilibrer une ration alimentaire avec de la mélasse de canne et de l'urée. Est-ce possible et dans quelles proportions ?

1. La mélasse, sous-produit de la cristallisation du sucre
2. La mélasse et l'urée en Algérie
3. Calcul d'une ration alimentaire à base de foin et de son de blé dur, complémentée par la mélasse et l'urée
4. Epilogue de « l'histoire de aami Lakhdar »

ANNEXES A

(Source : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – Valeur des aliments. Tables INRA 2007 (mises à jour 2010), éditions Quae, 2010)

ANNEXE A1 : Calcul des besoins journaliers en énergie, protéines et minéraux pour l'entretien, la production de lait et la gestation d'une vache laitière

ANNEXE A2 : Valeur du taux de substitution global (Sg) en fonction des caractéristiques des vaches et des fourrages pour des rations permettant d'équilibrer apports et besoins en pleine lactation

ANNEXE A3 : Calcul de la capacité d'ingestion (CI en UEL) d'une vache laitière

ANNEXE A4 : Valeur de la correction énergétique (E en UFL) en fonction des caractéristiques des vaches et des fourrages pour des rations permettant d'équilibrer apports et besoins en pleine lactation

ANNEXES B

ANNEXE B1 : Estimation du poids d'une vache par mesure du périmètre thoracique et correspondance avec le poids vif

ANNEXE B2 : L'observation de la note d'état d'une vache

ANNEXE B3 : Résolution mathématique de l'équation utilisée dans le chapitre XIX pour le calcul de la ration alimentaire.

UNE PETITE HISTOIRE POUR COMMENCER
Appelons-la
«L'histoire de aami Lakhdar»

Vous voulez acquérir ce livre ? Bonne idée ! Mais prenez deux minutes de votre temps et lisez cette petite histoire, avant. Vous saurez si ce que vous cherchez s'y trouve !

Aami Lakhdar, un brave fellah, producteur laitier de son état, est installé quelque part sur les vertes prairies des montagnes de Guelma, de Souk-Ahras, des Aurès ou de Kabylie, peu importe. Peut-être même qu'il n'existe pas. Un jour, vous le rencontrez. Il vous salue, vous invite à prendre le thé et vous raconte son coin de pays. Il dispose de quelques hectares de prairie naturelle où, aussitôt le printemps venu, il installe ses quelques vaches pour pâturer l'herbe jeune et savoureuse. Il vous raconte aussi qu'il est un peu contrarié car combien même les vaches sont heureuses dans cette verdure, il trouve l'herbe un peu rase pour venir à bout de leur insatiable appétit. Si bien que lorsque le soir, les vaches sont de retour à l'étable pour la traite, il ne peut pas s'empêcher de leur fournir un peu d'aliment concentré… enfin … un peu beaucoup parfois. Autant il a du mal à débourser les montants exorbitants pour acheter ce maïs et soja importés, autant il est généreux dans leur distribution, de peur que ses vaches, manquant de nourriture ne lui fournissent pas assez de lait. Quant à sa nourriture à lui et sa famille, il y a toujours moyen de s'alimenter avec le potager et les quelques poules qui partagent la petite cabane avec les deux moutons.

Il vous raconte encore, un matin, alors qu'il sortait les vaches, il remarque que la prairie, déjà bien dégradée par les pâturages qui successifs, était parsemée de larges touffes d'herbes vertes dépassant d'un bon trente centimètres le tapis ras jaunissant qui en formait le fond. Par hasard, ce jour-là, le technicien agricole rendait visite à notre brave paysan. Profitant de sa présence, aami Lakhdar lui fit part de ses observations sur la prairie. Gardant le silence, le technicien se mit à avancer dans le champ avec le paysan qui le suivait. Arrivé à la hauteur d'une première touffe d'herbe il pointe son doigt vers le bas et invite le paysan à regarder. Une belle bouse de vache étalée, mais déjà sèche trônait au milieu de celle-ci. Il continua à s'enfoncer dans la prairie et à toujours pointer son doigt vers le bas à chaque rencontre d'une touffe. Au milieu de chacune d'elle ou à côté, trônait toujours une belle bouse de vache.
Voyez-vous « ya aami Lakhdar » dit le technicien :

- La bouse des vaches et aussi leurs urines contiennent de l'azote, un fertilisant qui aide à faire pousser l'herbe. C'est un engrais produit par les animaux, et vous savez, les plantes fourragères ont besoin de se nourrir aussi. Quand vous leur apportez un peu de ces minéraux qui parfois manquent à leur sol, elles deviennent heureuses et vous le rendent en double, parfois en triple.

Heureux par ce qu'il venait d'apprendre, «aami Lakhdar» fit répéter deux fois le technicien pour s'assurer qu'il comprenait bien ce qu'il lui disait.

- Vous voulez dire, avec un peu d'engrais, je peux offrir jusqu'à trois fois plus de fourrage à mes vaches ?
- Et même, reprit le technicien, vous pouvez diminuer l'achat des aliments concentrés et remplacer la paille et le foin de vesce-avoine que vous achetez au prix fort à votre voisin, par du bon foin d'herbe que vous ferez vous-même. Partagez votre surface en deux. Laissez-en une pour continuer à faire pâturer les vaches et réservez la seconde pour constituer votre réserve d'été. Coupez l'herbe quand elle vous semblera suffisamment haute mais toujours avant que les épis des graminées ne sortent de leur gaine ou juste à ce moment-là. L'herbe sera encore tendre et les vaches en tireront grand bénéfice. Etalez-la au sol, et laissez là se faner naturellement sous notre beau soleil. Retournez-la au râteau de temps en temps pour chasser l'humidité et les moisissures et bottelez-la aussitôt qu'elle sera sèche. Conservez votre foin dans un lieu frais à l'abri du soleil et des intempéries. Si vous avez fertilisé raisonnablement d'engrais ou de fumier, vous pourriez faire même jusqu'à deux coupes dans l'année, la première à la sortie de l'hiver et la seconde à la fin du printemps qui vous feront passer l'été sans souci. Et il rajouta, peut-être même, une troisième à l'automne après les premières pluies.

Commune de Bouhachana dans la wilaya de Guelma (Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouhachana)	Vaches au pâturage dans la région de Souk Ahras (source : Facebook. GAPEL Souk-Ahras. 15 nov 2019)
Prairies naturelles de la région de Guelma. Photo : Moslim Gasmi (source : http://guelma.org/photos/)	Prairie ou pelouse naturelle sur le site antique protégé de Tiklat à El Kseur, Béjaïa (photo : Yama Triqui. 30/01/2021)
Les prairies de montagnes en Algérie	

Aami Lakhdar finit son année comme il put. Mais dès l'automne il épandit sur sa prairie tous le tas de fumier qui s'accumulait depuis plusieurs mois derrière l'étable. Il se procura ensuite un petit stock d'engrais azoté qui finit par rejoindre le fumier sur la prairie, dès que les premiers rayons du soleil de fin d'hiver commencèrent à réchauffer le sol.

Les résultats ne se firent pas attendre. A peine le mois de février fini, l'herbe abondait dans la prairie et les vaches, sorties au pâturage plus tôt que les années précédentes s'en donnèrent à cœur joie. Comme le technicien le lui a recommandé, aami Lakhdar confina les vaches dans la partie haute de la prairie proche de l'étable, et mis en défens la partie basse. Plus de 10 tonnes de foin sur un peu moins de deux hectares furent récoltées cette année sans compter ce que les vaches ont englouti en herbe tendre et savoureuse. Et pendant que notre brave paysan ne trouvait plus de place où empiler les balles de foin, le collecteur de lait du doubler ses tournées pour venir à bout des quantités produites.

Mais notre brave paysan n'était pas au bout de ses peines. Une question continuait à le tarauder. Avec toute cette herbe fraiche et ce foin, il n'arrivait pas à diminuer les frais que lui causait l'achat de l'aliment concentré, surtout depuis que le prix de ce dernier a quasiment doublé. Il était tenté de le supprimer de la ration de ses vaches, mais il était inquiet des conséquences. Il passait ses nuits à calculer et recalculer, mais n'aboutissait jamais au même résultat. Et plus son indécision grandissait, plus son sommeil s'éloignait. Encore fatigué de sa nuit courte, il s'est réveillé un matin, fermement décidé à trouver une réponse à sa question. Après avoir sifflé trois cafés de suite, histoire de se réveiller de sa mauvaise nuit, il se dirigea vers la mon-

tagne de balles de foin derrière l'étable, en extirpa autant d'échantillons qu'il put et se dirigea vers la coopérative de sa région pour en demander une analyse.

Trois jours plus tard, le verdict tombe. Voici l'analyse que la coopérative lui délivra :

	%		g/kg MS				
Type de fourrage	**MS**	**DCS**	**MM**	**MAT**	**CB**	**Ca_{abs}**	**P_{abs}**
Foin	86	55	80	75	350	1,4	1,2
MS : matière sèche ; **DCS** : digestibilité cellulase de la matière sèche ; **MM** : matière minérale ; **MAT** : matière azotée totale ; **CB** : cellulose brute ; **Ca** : calcium ; **P** : phosphore							

Tout heureux de recevoir enfin «le sésame» qui va le délivrer de ses angoisses nocturnes et l'aider à prendre la bonne décision sur le concentré, il se mit fébrilement à déchiffrer le document tant bien que mal. Il le lit une première fois, de droite à gauche, bien sûr, puis ne comprenant pas, il le relit de gauche à droite, de bas en haut, de haut en bas. Il retourna même la feuille, croyant l'avoir saisie à l'envers. Mais toujours rien ! Et nulle part, le document ne parlait de la valeur alimentaire de son foin. Il y avait bien quelques chiffres, mais cela ne lui dit absolument rien.

Il dépose les armes et décide alors de confier sa peine à un agronome pour l'aider. Et c'est ce qu'il fit en vous invitant à prendre du thé. Il vous demande de lui expliquer si cette analyse est une blague et si elle ne l'est pas quelle est alors **la valeur alimentaire de son foin** ?

Si vous êtes capable de répondre à aami Lakhdar, refermez ce livre, passez votre chemin et continuez votre excellent travail. Si vous ressentez par contre quelque gêne ou hésitation, alors lisez-le et prenez en grand soin car que vous soyez technicien, agronome, agriculteur averti ou simplement curieux, il vous sera bien utile. Vous y trouverez la réponse à la question posée et au dernier chapitre, la fin de cette histoire.

AVANT PROPOS

A QUI EST DESTINÉ CE LIVRE ET DANS QUEL BUT IL EST RÉDIGÉ ?

Mon projet initial était d'intituler cet ouvrage « l'alimentation des vaches laitières ». Bien que le thème du livre soit toujours conçu dans cet esprit, j'ai décidé en cours d'écriture de changer de titre pour « Algérie, la crise du lait, le fourrage et l'alimentation de la vache laitière ». C'est un titre qui m'a paru plus approprié pour faire ressortir l'importance d'une bonne maîtrise de la question fourragère avant de se lancer dans un élevage laitier. Il ne sert à rien de savoir comment calculer une ration alimentaire pour la vache si la base de son alimentation - le fourrage - fait défaut dans sa disponibilité, sa conservation et sa qualité. Car en définitif toute viande ou tout lait, n'est que de l'herbe transformée et dans nos élevages, ce ne sont pas les vaches qui font défaut, mais l'herbe pour les nourrir.

C'est ce qui fait dire à l'économiste S. BEDRANI[1] : «… *pourquoi maintient-on la politique consistant à pratiquer un faible taux de droit de douane (5%) sur l'importation de vaches laitières et de génisses pleines alors que tout le monde sait que ces animaux sont mis à l'abattage après un vêlage ou deux ? A-t-on évalué cette politique qui coûte au pays quelques millions de dollars par an … Les agriculteurs et les ingénieurs algériens n'ont-ils pas la capacité de produire ces animaux à moindre coût pour le pays ? …*»

Les questions sont pertinentes, mais fera-t-on plus de vêlage à ces animaux, même s'ils sont produits en Algérie ? Non ! Parce que simplement ils sont mal nourris. La question dans ce cas n'est pas tant de savoir produire des animaux (bien qu'elle soit importante) mais comment exploiter adéquatement les ressources fourragères pour leur fournir des aliments à la hauteur de leur potentiel génétique. C'est sur ce problème que bute notre production laitière aujourd'hui.

Vous trouverez dans ce livre plusieurs parties dont :

- un exposé sur la connaissance et les caractéristiques d'un fourrage avec un survol sur l'anatomie et le processus digestif particulier de la vache laitière en tant qu'animal ruminant ;
- une approche théorique et pratique des teneurs énergétique et protéinique des fourrages et des besoins des animaux
- la production et la conservation des fourrages ;
- comment comprendre, interpréter une analyse fourragère et appliquer les équations de prédiction pour calculer la valeur alimentaire d'un fourrage ;
- et enfin comment établir une ration alimentaire en ayant clairement identifié les objectifs de production avec la bonne vache et les bons intrants.

A qui est destiné ce livre ?

Il s'adresse aux agronomes et aux techniciens de l'Algérie et de ses pays voisins qui veulent sortir des chemins battus de la jachère pâturée, du sempiternel foin de vesce-avoine ou de la vaine pâture érosive et désertifiante. Il s'adresse aussi aux étudiants et aux jeunes agriculteurs, qui se perdent dans leur recherche, quand ils abordent la question des fourrages, par le fait d'une littérature qui prêche par ses extrêmes : soit trop générale, soit trop pointue ou souvent inadaptée. Les formateurs peuvent aussi trouver matière à alimenter leurs enseignements par les nombreux exemples de calcul proposés.

Et pourquoi ce livre ?

Il existe en Algérie une disproportion entre la production fourragère et les ambitions de la politique laitière. Un étudiant enquêtant sur les élevages laitiers de la région de Tizi-Ouzou mentionne dans son mémoire de magistère : *«…Trois systèmes d'alimentation sont identifiés : le système «hors sol », le système « concentré + fourrage » et le système « classique » « fourrage + concentré ». Ce dernier, base de toute production laitière, est le moins représenté …»*. Cette dépendance des élevages laitiers algériens vis à vis du concentré est si forte qu'elle a fini par produire un type d'élevage insolite désigné par l'expression : « système concentré + fourrage ». On comprend par-là, que c'est un système qui complémente le concentré par du fourrage et non l'inverse.

[1] Interview au journal El Watan du 23 avril 2018

Et pourquoi encore ce livre ?

Dans le domaine des fourrages, les connaissances agronomiques modernes ont été historiquement développées dans le contexte climatique tempéré européen dont les étés pluvieux sont propices à la production herbagère. Ce n'est pas le cas de nos climats. La pluviométrie moins généreuse et avec une répartition annuelle de type méditerranéen, induit une production végétale différente dans sa composition botanique, sa productivité et ses périodes de production. Mais les paradigmes découlant des milieux tempérés ayant largement dominé nos enseignements agronomiques sans adaptation, les techniciens et agronomes de nos pays méditerranéens arrivant à la pratique professionnelle à l'issue de leur formation, se retrouvent dans une réalité qui ne se prête pas toujours aux pratiques agricoles apprises. C'est le cas par exemple de l'ensilage qui est une technique courante développée dans les pays tempérés pour conserver l'herbe abondante récoltée en été. Bien que largement enseignées à nos étudiants, cette technique tarde à se développer et à s'adapter dans nos régions qui présentent des potentiels fourragers élevés. Il y a dans ce domaine, comme un paradoxe entre nos apprentissages et la réalité.

Sans prétendre résoudre ce paradoxe dans sa globalité – beaucoup de recherche restant encore à entreprendre pour mieux connaitre nos écosystèmes fourragers – cet ouvrage propose une synthèse des connaissances sur les fourrages qui va des aspects botaniques au rationnement des animaux en abordant, dans notre contexte agricole les nombreuses questions relatives à leur production, conservation et évaluation de leur valeur alimentaire. C'est en quelque sorte un défrichement préalable qui vient en soutien au développement d'une pensée agronomique renouvelée, ancrée dans nos réalités agro-écologiques propres. C'est un exercice qui s'impose aujourd'hui à toutes celles et ceux qui ont à cœur la volonté de sortir notre secteur laitier des goulots d'étranglement qui l'enserrent car il est clair que le rythme actuel d'importation de poudre de lait n'est plus soutenable pour notre économie ni à court ni à long terme.

Algérie

France

Un même emballage mais des laits différents

POUR LES SPECIALISTES DE l'AGRONOMIE ET DE L'ELEVAGE

Il existe à travers le monde, différents systèmes d'évaluation de la valeur nutritive des fourrages. Dans le système d'alimentation français, la valeur nutritive d'un fourrage pour la vache laitière est composée par quatre éléments :

- la teneur en énergie exprimée en UFL/kg MS,
- la teneur en protéines, PDIM et PDIE exprimée en g/kg MS,
- la valeur d'encombrement exprimée en UEL/kg MS
- et la teneur en éléments minéraux exprimée en g/kg MS

Bien que reposant sur les principes fondamentaux communément admis dans le domaine de la nutrition animale, ce système n'est cependant pas universel dans sa forme. Le système nord-américain par exemple exprime l'énergie en Mégacal / kg de MS au lieu des UFL, les protéines en gramme de protéines brutes par kg de MS au lieu des PDI et n'utilise pas les notions de valeur d'encombrement. En Belgique, c'est le système belgo-hollandais qui est utilisé. Il exprime l'énergie du fourrage en VEM (*VoederEenheid Melk*) qui est équivalent à l'énergie de 1 gramme d'orge au lieu de 1 kg pour l'UFL du système français. Le système russe utilise l'avoine au lieu de l'orge comme référent pour l'énergie … Et ainsi de suite pour plusieurs autres pays et autres régions du monde.

L'Algérie comme les autres pays du Maghreb, ne possède pas un système d'évaluation propre. Elle utilise par défaut et pour des raisons historiques le système français. Il faut toutefois noter que l'utilisation de ce système en Algérie ne suit pas toujours les mises à jour successives que celui-ci subit périodiquement dans son pays d'origine. La dernière mise à jour de ce système a été publiée par l'INRA France en 2018. Mais cette édition, améliorée en précision de calcul et enrichie par des concepts nouveaux adaptés au haut niveau technique et à la productivité élevée des élevages français et européens est difficilement applicable, voire impossible au contexte des élevages algériens qui peinent encore à obtenir une production fourragère en quantité. Dans un article[2] récemment publié à propos de la complexité de cette dernière mise à jour par rapport à celle de 2010, les auteurs (G. TROU et V. BROCARD) notent :

« *Une évolution majeure du système est que les valeurs des tables ne sont plus que des valeurs repères puisque la valeur des aliments change selon la ration dans laquelle l'aliment est apporté. Il n'est donc plus possible de se contenter d'additionner les valeurs de chaque aliment pour avoir la valeur des rations. Le calcul "à la main" devient donc impossible : les besoins et capacité d'ingestion dépendent de la ration, et la ration se réajuste en fonction des besoins et ingestions. L'utilisation d'un logiciel devient indispensable si on veut prendre en compte ces évolutions. Il est impératif de prendre soit le système 2018 dans son ensemble soit pas du tout. Prendre en compte les nouvelles valeurs "tables" des aliments sans prendre en compte les nouveaux besoins conduira à des erreurs de rationnement. Autre nouveauté : la ration n'est plus seulement calculée en fonction de la satisfaction des besoins mais en fonction des objectifs : production, efficacité de l'azote, coût, pollution de l'environnement et qualité des produits.* »

Le texte est clair. Dans leur bataille pour la production du lait, les pays comme l'Algérie doivent, en matière de soutien technique à leur élevage, **s'adapter ou régresser** !!!

Comme nous n'en sommes pas là dans le développement de notre élevage laitier et pour ne pas nous retrouver dans la situation de celui qui s'attaque au mont Everest avant d'avoir appris à marcher sur une colline, il m'a paru important d'initier cette synthèse sur les fourrages et le rationnement des vaches laitières comme base commune de connaissances, mais volontairement limitées aux principes de la version 2010 du système d'alimentation français[3] (puisque nous dépendons encore de celui-ci). Les explications qui seront données sur l'évaluation de la valeur nutritive des fourrages et le rationnement des vaches laitières dans les chapitres XIII, XIV, XVI, XIX et XX s'appuient donc sur cette édition et excluent celle de 2018. Nous présentons, dans le chapitre XIII, une sélection des équations de prédiction des valeurs alimentaires de cette version, potentielle-

[2] https : //opera-connaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=145400
[3] Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments. Tables INRA 2007

ment applicables dans notre contexte et dans les chapitres XIV et XVI, des exemples concrets pour expliquer et commenter leur application et leur « applicabilité ».

Par sa relative simplicité, la version 2010 est applicable à nos élevages et permet encore des calculs manuels (bien qu'un peu complexes) des valeurs fourragères et des rations alimentaires. Il est urgent d'en faire un outil privilégié pour faire évoluer les pratiques d'élevage actuelles et réunir les conditions pour l'émergence d'un système propre dont l'élaboration peut se concevoir comme un grand projet « Afrique du Nord » à inscrire dans le cadre d'un programme de coopération Nord-Sud. C'est le prix de notre indépendance alimentaire et de la durabilité de notre production laitière, entendu dans le sens de durabilité des systèmes de production et de celle de leur environnement. Il n'existe pas de développement sans le savoir ni de savoir sans la volonté de le développer.

PREMIERE PARTIE

LES FOURRAGES ET LA DIGESTION DES RUMINANTS

CHAPITRE I : Les aliments pour les vaches laitières et leur disponibilité en Algérie

Je n'inventerai rien en disant que la vache laitière est un animal herbivore. Son alimentation est basée sur les produits végétaux (bien sûr, c'était avant les farines animales et maintenant après leur interdiction) et le fourrage n'en constitue qu'une partie. Ces aliments variables dans la forme, sont classés selon quatre catégories.

- Les fourrages
- Les racines et tubercules
- Les aliments concentrés
- Les coproduits

1. Les fourrages

On désigne généralement par fourrage, la partie aérienne, formée de tiges, feuilles et inflorescences de toutes plantes spontanées ou cultivées, utilisée pour assurer l'alimentation des vaches. En général les espèces appartenant aux familles des graminées et légumineuses sont privilégiées, car les premières sont riches en énergie et les secondes en protéines. Mais d'une manière générale, l'intérêt premier des fourrages est d'être riche en fibres cellulosiques, nécessaires à la fonction de rumination de la vache et à la couverture d'une grande partie de ses besoins en énergie. On distingue, selon l'origine des fourrages, deux ensembles :

- les fourrages spontanés qui sont constitués par la flore naturelle des prairies permanentes. C'est ce qui est désigné en général comme « l'herbe » ;
- les fourrages cultivés soit sous forme de prairies temporaires soit sous forme de culture annuelle.

1.1. Les prairies permanentes

Ce sont des formations végétales naturelles basses formées d'espèces herbacées et vivaces. Ces formations, assez répandues sous climat tempéré du nord européen et asiatique, sont rares sur la rive sud de la méditerranée moins arrosée. Il s'agit d'une végétation permanente dont le cycle est marqué par un repos végétatif en hiver et une reprise au printemps qui se poursuit tout l'été, jusqu'à la fin de l'automne.

En Algérie on trouve ce type de prairies dans les régions montagnardes où les conditions de température et d'humidité dues à l'altitude compensent la sécheresse estivale des plaines (fig. I.1 à I.3). Essentiellement pâturées, elles sont mal valorisées et généralement épuisées par le surpâturage. Dans les régions tempérées européennes par contre, où il existe une tradition de gestion de l'herbe, elles gardent une productivité élevée et fournissent une forte production de fourrage naturel exploité par la fauche ou le pâturage.

1.2. Les fourrages cultivés

On distingue dans cette catégorie, les prairies temporaires et les cultures fourragères annuelles.

1.2.1. Les prairies temporaires ou prairies cultivées

Contrairement aux prairies permanentes qui sont des écosystèmes naturels entretenus par la fauche et le pâturage, les prairies temporaires sont artificielles dans le sens où elles exigent l'intervention humaine pour être installées (fig. I.4). Cette façon de produire du fourrage, bien que possible dans les zones montagnardes maghrébines, est absente de nos traditions agricoles. Il y a une certaine méconnaissance de cette ressource et les recherches développées sur ce sujet (voir les nombreux travaux de A. ABDELGUERFI) ne sont pas toujours valorisées. Sous les climats des régions nordiques (Europe, Canada, Russie …), ces prairies temporaires sont installées, pour une durée de 4 à 5 ans, par des semis d'espèces fourragères herbacées vivaces sélectionnées dans le cortège floristique naturel des prairies permanentes. On y trouvera par exemple, pour les graminées, la fléole des près, la fétuque, les dactyles, le brome, le ray-grass … et pour les légumineuses essentiellement le trèfle et le lotier auquel se rajoutent des espèces exotiques comme la luzerne.

Figure I.1 A gauche, prairie dans les Alpes suisses. A droite, prairie de montagnes dans la région de Souk Ahras (Algérie)

Figure I.2 : A gauche, prairie permanente en Indre-et-Loire en France, le 9 juin 2018 après une première coupe d'herbe effectuée le 15 mai 2018. A droite, prairie de montagne surpâturée en Kabylie

Figure I.3 : Le potentiel «prairial» n'est pas homogène sur toutes les zones montagnardes en Algérie. A gauche, les monts de Souk Ahras. A droite les monts de Tlemcen

La mise en place de ces prairies varie d'une région à l'autre selon les types climatiques. Au Canada par exemple, où les sols ne manquent pas d'humidité à la sortie de l'hiver, les associations fourragères formées de graminées et de légumineuses sont semées avec une céréale comme plante-abri dès le début du printemps. Cette dernière sera récoltée la première année et le fourrage exploité à partir de la seconde. La prairie persiste pendant 4 à 5 ans et sa production décline à partir de la 5ème année. Elle est alors labourée à l'automne et ressemée au printemps suivant selon la même technique.

Sous des climats tempérés relativement plus secs comme dans les régions françaises, les semis sous climat séchant de printemps sont déconseillés et ils sont plutôt réalisés en tout début d'automne. Le choix des associations fourragères (Raygrass, trèfle …) dépendent des conditions climatiques et du mode d'exploitation de la prairie.

Figure I.4 : A gauche, prairie cultivée en première année d'implantation. A droite, récolte de foin sur prairie cultivée, conditionné en balles rondes (en régions tempérées européennes)

1.2.2. Les jachères fauchées ou pâturées

Bien que ne répondant pas à la définition de prairies temporaires tel que présentées ci-dessus, les jachères dites fauchées ou pâturées, peuvent être assimilées à ces dernières par le fait qu'elles représentent une disponibilité fourragère temporaire. Cette ressource fourragère, représentée par une végétation spontanée annuelle, bien que frugale, est néanmoins prise en considération dans l'inventaire statistique des surfaces et productions fourragères algériennes[4]. Elle peut être améliorée par des sursemis ou des semis directs comme c'est illustré à la figure I.5. (Photos publiées par D. BELAID[5]) qui commente dans un autre texte[6] «… *Ces jachères sont en fait des prairies temporaires. Elles sont composées d'une flore spontanée et variée (fig. I.5) En automne, le semis direct pourrait permettre de ressemer ces prairies temporaires afin d'enrichir leur flore et d'arriver à une meilleure valeur alimentaire... Il ne s'agit pas de remplacer la flore spontanée mais de l'enrichir par exemple en graminées fourragères telles le ray-grass ou des mélanges d'espèces (méteil[7]) ...* »

1.2.3. Les cultures fourragères annuelles

C'est la pratique agricole courante et à peu près unique de production fourragère en Algérie. Cette culture se fait sur une saison et elle est récoltée en herbe fraiche ou en foin (fig. I.6). Composée en général du mélange de vesce-avoine et parfois de trèfle d'Alexandrie, quand les conditions hydriques le permettent, la diversité

[4] R. ISSOLAH : Les fourrages en Algérie. Situation et perspectives de développement et amélioration. INRAA. CRP Mehdi Boualem. Laboratoire des Ressources Phytogénétiques. BP 37. Baraki. Alger. Algérie

[5] D. BELAID : Algérie, semis des jachères pâturées. Collection Brochures Agronomiques. Edition 2016

[6] D. BELAID : Algérie, réduction de la jachère, du nouveau. https : //agriculturealgerie.blogspot.com/2015/07/algerie-reduction-de-la-jachere-du.html

[7] Le méteil est un mélange de plusieurs céréales et légumineuses généralement récolté en ensilage au stade grains immatures. Il peut aussi être récolté en foin ou en pâturage.

floristique de ces cultures est très pauvre. On voit néanmoins se développer ces dernières années des cultures de maïs fourrager irrigués dans le sud (fig I.12). Dans les pays producteurs laitiers européens c'est la culture du maïs fourrager et des céréales immatures associées à des légumineuses qui dominent le secteur des cultures fourragères annuelles (fig. I.7). D'autres cultures sont également pratiquées comme la betterave fourragère, le colza fourrager, le raygrass d'Italie …etc…

1.3. Les modes de conservation

Quelle que soit l'origine du fourrage (prairie permanente, temporaire ou culture annuelle), celui-ci est soit pâturé directement par les animaux soit fauché. A partir du moment où il est fauché, il peut être distribué directement en fourrage vert ou conservé pour être servi plus tard. Selon le type de conservation, trois produits sont définis en fonction de leur teneur en matière sèche : le fourrage vert, le foin et l'ensilage.

1.3.1. Le fourrage vert

On désigne par fourrage vert, un fourrage frais contenant 10 à 30% de matière sèche. C'est une pratique assez courante, chez les éleveurs maghrébins, de cultiver, quand les conditions hydriques le permettent, du fourrage vert sous forme de sorgho, de bersim ou de luzerne. Dans les pays européens, le fourrage vert, fourni essentiellement par les prairies permanentes ou temporaires est en général pâturé mais il peut être également coupé et distribué à l'auge (fig. I.8).

1.3.2. Le foin

A l'opposé du fourrage vert le foin présente 85% de matière sèche. Il est obtenu par fanage du fourrage vert au champ ou en grange. Débarrassé de son humidité, il est facile à conserver et peut être servi tout au long de l'année. Produit généralement à partir d'herbe des prairies permanentes et temporaires dans les régions tempérées, le foin est en Algérie essentiellement à base de cultures annuelles de vesce-avoine (fig. I.9) ou accessoirement d'herbe de jachère fauchée. Lors des opérations de fanage, ce fourrage peut perdre de ses qualités par rapport au fourrage vert.

1.3.3. L'ensilage

La technique de l'ensilage consiste à mettre en tas ou en silo l'herbe ou le fourrage vert récolté puis à le tasser pour en sortir l'air et l'oxygène (fig. I.10). En l'absence d'oxygène, des bactéries anaérobies, naturellement présentes dans le fourrage fermentent[8] les sucres solubles contenus dans les cellules de celui-ci (chapitre II) et les transforment en acide lactique qui fait baisser le pH[9] du tas jusqu'à des valeurs proches de 4. Cette baisse de pH inhibe l'action des bactéries aérobies[10] et des moisissures qui peuvent faire pourrir le fourrage. Le fourrage conservé en ensilage présente un taux de matière sèche d'environ 40%, intermédiaire entre le foin et le fourrage vert et garde des qualités nutritives plus proches du fourrage vert que du foin.

Cette technique, pratiquée à l'origine pour conserver l'herbe récoltée des prairies permanentes et temporaires est élargie maintenant au maïs fourrager (plante entière hachée) et aux mélanges de céréales immatures et de légumineuses comme la vesce-avoine ou divers méteils. Rare dans les traditions agricoles algériennes, elle est actuellement en émergence avec la technique de conservation en balles rondes enrubannées appliquée aux cultures de maïs fourrager, irriguées sous pivot ou par rampe (fig. I.12). Cependant, la question du prix de revient de ce produit reste entière. Aux coûts de transport (des régions sahariennes vers le nord) se rajoutent ceux de l'irrigation.

---

[8] La **fermentation** est la transformation de certains sucres par des micro-organismes en l'absence d'oxygène. On parle alors de phénomène anaérobique (voir explication détaillée au chapitre III).

[9] **Le pH** (ou potentiel hydrogène) mesure l'acidité ou la basicité d'une solution ou d'un milieu sur une échelle conventionnelle qui varie de 1 à 14. **Pour un pH = 7** la solution est dite neutre. Elle n'est ni acide ni basique, comme l'eau. **Pour un pH < 7** la solution est dite acide comme le jus de citron dont le pH est compris entre 2 et 3. **Pour un pH > 7** la solution est dite basique. C'est le cas de l'eau de mer dont le pH est égal à 8 ou l'eau de javel avec un pH égal à 12. Plus le pH d'une solution diminue plus elle est acide.

[10] Qui ne peuvent vivre qu'en présence d'oxygène.

Terres céréalières après récolte

Maigre pâturage après les pluies d'automne

Possibilité d'amélioration par semis direct sur jachère. Avant et après (D. BELAÏD)

Flore spontanée et variée dont on retrouve des vestiges sur des sites protégés comme ici entre les ruines romaines de Tiklat à El Kseur dans la wilaya de Béjaïa (photo Yama Triqui)

Figure I.5 **:** Les jachères fauchées ou pâturées et possibilité d'amélioration

Figure I.6 : A gauche, culture annuelle de vesce-avoine au stade avoine immature dans la région du Morbihan en France. A droite, culture annuelle de vesce-avoine a un stade de graines formées dans la région d'Annaba en Algérie

Figure I.7 : Culture annuelle et récolte de maïs fourrager largement pratiquée dans les pays producteurs de laits européens et nord-américains

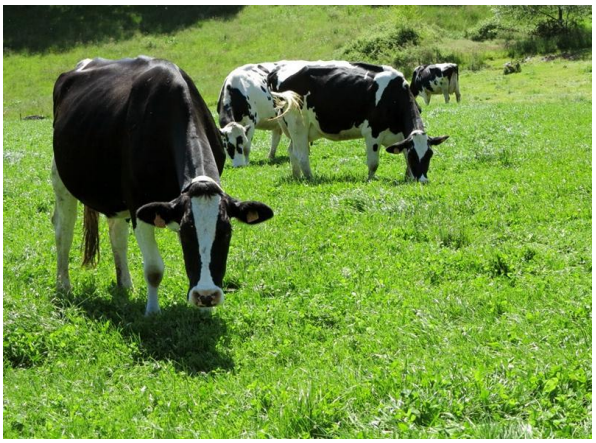


Figure I.8 : Fourrage vert pâturé ou distribué à l'étable en région tempérée européenne

Figure I.9 : Vente de foin de vesce-avoine aux bords de la route dans la région de Tizi-Ouzou

Figure I.10 : A gauche, remplissage et compactage d'un ensilage en silo-couloir (Europe). A droite, maïs fourrager ensilé en balles rondes enrubannées à El Ménéa et livré à une ferme laitière de la région de Tipaza

Figure I.11 : A gauche, fermeture hermétique du silo pour fermentation. A droite, ouverture du silo 6 à 7 semaines plus tard pour distribution de l'ensilage à l'étable (Europe)

A/ Champ de maïs fourrager irrigué par rampe d'irrigation ou sous pivot dans la région d'El Ménéa

B/ Coupe, hachage et chargement du maïs fourrager

C/ Chantier de confection de l'ensilage en balle ronde enrubannée

Figure I.12 : Culture et ensilage de maïs fourrager en balles rondes enrubannées dans la région d'El Ménéa

2. Les racines et tubercules

On désigne par racines et tubercules, les parties souterraines d'une plante dans lesquelles cette dernière accumule ses réserves glucidiques. Ce sont des parties riches en eau (75% et plus) et en énergie, grâce à l'accumulation des sucres solubles et de l'amidon mais pauvres en azote et en fibre cellulosique. Nous verrons plus en détail la signification de ces notions et leurs implications sur le plan alimentaire de la vache laitière. La betterave fourragère, la chicorée, le navet, la carotte, le manioc, le topinambour et la pomme de terre rentrent dans cette catégories d'aliment (fig. I.13 et I.14). Ce sont des aliments savoureux et très digestibles.

Mais ces cultures ne sont rentables en tant que produit alimentaire animal que s'il y a surplus de production par rapport à celle destinée à la consommation humaine (sauf la betterave fourragère) ou à une première valorisation par l'industrie agroalimentaire. Ce n'est pas le cas pour l'Algérie dont l'autosuffisance alimentaire humaine pour ces produits n'est pas optimale.

Figure I.13 : Vaches nourries aux tubercules de pomme de terre. Idéalement, les tubercules doivent être broyés avant d'être distribués aux animaux pour éviter des accidents de déglutition. Risques de «fausse route» pouvant causer des étranglements

Figure I.14 : Betterave fourragère. A gauche, récolte. A droite, au champ

3. Les aliments concentrés

Les aliments concentrés présentent des teneurs en matière sèche élevées (plus de 85%) et sont riches en énergie ou en protéines. Ils sont constitués soit par des graines (céréales riches en énergie ou légumineuses en matières azotées) soit par des sous-produits industriels (appelés aussi coproduits) comme les tourteaux ou les drêches de brasserie. Ces aliments qui ne remplacent pas le fourrage comme aliment de base, servent à équilibrer la ration quand celle-ci présente des déficits. Ils doivent être distribués en quantité limitée car ils réduisent la consommation volontaire du fourrage et peuvent créer des pathologies digestives.

3.1. Les grains

En Algérie, la quasi-totalité des aliments concentrés sous forme de grains (orge, maïs, soja …) est importée. Toutefois, une production de maïs grain (fig. I.15) a vu le jour ces dernières années dans les régions sahariennes d'Adrar et d'El Ménéa où l'irrigation est possible mais elle reste marginale par rapport aux quantités importées. On distingue deux catégories de produits (fig. I.16) : les concentrés riches en énergie (blé, orge, avoine, maïs…) et les concentrés riches en matières azotées aussi appelés protéagineux comme le soja, le pois, la féverole, le lupin...

Figure I.15 : Récolte de maïs grains dans la région d'Adrar

Figure I.16 : A gauche, mélange de graines de céréales et de légumineuses. A droite graines de soja

3.2. Les coproduits

Un coproduit est une matière produite au cours du même processus de fabrication et en même temps que le produit principal. Autrement dit, un coproduit est un produit qui dérive d'une production principale. Exemple, la paille est un coproduit de la production céréalière ou les grignons d'olive de la production d'huile d'olive. On distingue deux types de coproduits : ceux qui dérivent d'une production agricole comme la paille et ceux qui dérivent d'une industrie agroalimentaire comme les tourteaux de colza ou la pulpe de betterave. Considérés auparavant comme déchets, ces produits sont depuis plusieurs décennies valorisés comme aliments de bétail reconnus pour leurs bonnes qualités nutritionnelles. Plusieurs d'entre eux, riches en énergie ou en matières azotées rentrent dans la catégorie des aliments concentrés (fig. I.17).

Les coproduits qui dérivent d'une production agricole en Algérie sont formés essentiellement par la paille et les rebuts de datte. La paille peu digestible est riche en fibres lignifiées, et pauvre en énergie et matières azotées. Les rebuts de datte par contre sont riches en énergie et matières azotées. Ils peuvent rentrer dans la catégorie des aliments concentrés, mais ils sont faiblement valorisés.

Pour les coproduits qui dérivent des industries agroalimentaires (tourteaux de soja ou de colza, pulpe de betterave …) leur offre en Algérie est inexistante actuellement car les industries qui les génèrent n'y sont pas développées ou sont à l'arrêt (cas des raffinerie d'El-Khemis et de Sfisef pour la pulpe de betterave). L'huile et le sucre sont entièrement importés sous forme de produits semi raffinés mais on assiste ces derniers temps à un début de culture de colza. Plus fréquents, on trouve d'autres coproduits comme :

- le son, issu des produits de meunerie,
- les drêches de brasserie, issues de l'industrie de la bière,
- les grignons d'olive issus de l'oléiculture

- et enfin le marc de raisin issu de la production de vin et du jus de raisin.

Mise à part le son, les autres coproduits bien que significativement présents, sont faiblement valorisés dans l'alimentation des vaches laitières par méconnaissance et/ou insuffisance de recherche scientifique et technologique.

Figure I.17 : A gauche, tourteau de soja. A droite, rebut de datte

CHAPITRE II : La production laitière dans le monde et en Algérie

1. Évolution et mutation de la production laitière dans le monde et en Algérie

Dans les élevages traditionnels de nos grands-parents, on se contentait d'élever deux ou trois vaches ou une dizaine tout au plus pour les plus gros éleveurs, qui produisaient du lait pour la famille et l'excédent était vendu directement au consommateur. Le lait était produit dans le cadre d'une agriculture de proximité développée dans les zones agricoles périphériques des villes, ce qui permettait un lien direct entre les producteurs de lait et les consommateurs. Ces fermiers, installés en périphérie des villes et villages, étaient tout à la fois producteurs et livreurs de lait. La figure II.1 présente quelques photos d'archive familiale d'une ferme de la région de Tlemcen. Ce système de production suffisait à fournir le lait à toute la ville où chaque quartier avait son livreur attitré. Nous ne connaissions pas de lait en poudre. Le fermier venait livrer lui-même son lait qu'il transportait dans une charrette tirée par un cheval jusqu'aux portes des maisons. Ce système de producteurs-livreurs de lait développé en périphérie des villes, avait prévalu également autour de nombreuses villes européennes jusqu'aux années quarante. Dans ce type d'agriculture, les fermes vivaient en autarcie c'est-à-dire qu'elles achetaient peu d'intrants à l'extérieur et l'alimentation de la vache laitière était produite entièrement ou presque à la ferme. Le rendement en lait des vaches était modeste, mais suffisant et la récolte de l'herbe ou le fourrage était faiblement mécanisée.

Après la deuxième guerre mondiale, l'Europe connut de graves pénuries alimentaires. Par une politique globale de modernisation de l'agriculture et la généralisation de la fertilisation azotée[11], la production des aliments pour les élevages laitiers (fourrage, concentrés, coproduits …) se développa et accompagna une croissance fulgurante du volume de lait produit par des vaches de plus en plus sélectionnées. La production laitière artisanale et familiale, rentable à son échelle et développée dans le contexte d'une relation directe entre producteur et consommateur disparut au profit d'une production de lait de type industriel. Et du lait transporté en bidons sur des charrettes tirées par des chevaux pour être livré au consommateur, on passa au transport du lait en camion-citerne pour être livré à l'usine de transformation avant d'arriver au consommateur par les réseaux de distribution commerciaux (fig. II.2).

En Algérie, le système producteur-livreur qui assurait une certaine autosuffisance en lait persista jusqu'à la fin des années soixante voire soixante-dix, dans certaines régions et disparut à cette période, mais pas pour les mêmes raisons qu'en Europe. On peut énumérer un faisceau de causes, qui toutes ensembles et non séparément ont contribué à cette régression malgré une demande en lait croissante tirée par une démographie galopante. On peut citer entre autres :

- la réaction hostile des producteurs livreurs à la réglementation de la vente du lait cru ;
- la croissance urbaine, la «bétonisation» des zones agricoles périphériques des villes et la dévitalisation des zones rurales;
- la disponibilité limitée des ressources fourragères et l'insuffisance de recherche et de vulgarisation agronomiques pour son développement ;
- l'insuffisance des systèmes coopératifs qui font la force des secteurs laitiers européens et nord-américains ;

Aujourd'hui, malgré une politique volontariste active axée sur l'importation de génisses pleines et de l'aliment concentré, l'Algérie peine à retrouver son autosuffisance en lait, perdue à partir des années soixante-dix. Parmi les diverses facteurs explicatifs de ce retard, prédomine la disponibilité limitée des ressources alimentaires pour les vaches laitières, l'absence de politique globale pour la production laitière et l'importation massive du lait en poudre pour combler les déficits.

[11] A la fin des années 40, la fertilisation azotée fût encouragée en Europe pour absorber les grands surplus de nitrates[11] hérités de l'industrie de la première et seconde guerre mondiale.

Figure II.1 : Ferme de producteur-livreur laitier installée dans la zone agricole périphérique de la ville de Tlemcen entre les années 40 et la fin des années 60. Photos familiales gracieusement mises à notre disposition par **M. Mokhtar AJAR** de la ferme de son grand-père qui était située dans le quartier de Bab el Khemis à Tlemcen. Toutes les photos sont originales sauf la dernière, utilisée ici à titre d'exemple pour illustrer le type de charrette en usage à cette époque pour la livraison du lait aux portes des maisons.

Figure II.2 : A quelques décennies d'intervalle en Europe et en Amérique du Nord, du lait transporté en bidons sur des charrettes tirées par des chevaux (photo du haut) au lait transporté en camion-citerne

2. Disponibilité limitée de l'alimentation qui freine la production laitière

La récession et la disparition du système des producteurs-livreurs laitiers en Algérie n'a pas été, pour des raisons historiques et agro-climatiques, suivi comme en Europe par le développement quasi industriel de la filière lait. Dans les tableaux II.1, II.2, II.3 et II.4 ci-dessous nous avons fait figurer en vert les ressources alimentaires pour vaches laitières largement disponibles dans les pays européens producteurs laitiers en comparaison avec celles disponibles en Algérie et dont nous avons surligné en rouge le déficit. Le portrait alimentaire révélé par ces tableaux est sans équivoque. Le troupeau laitier algérien ne subit pas seulement un déficit fourrager, mais une véritable crise alimentaire chronique et structurelle, qui entrave tous les efforts visant à le développer.

On constate que le fourrage (vert, foin et ensilage) des prairies naturelles ou cultivées (prairies permanentes ou temporaires) est totalement absent en Algérie alors qu'il domine dans les pays européens et nord-américains. L'absence de ce type de fourrage, produit au moindre coût du fait d'un nombre réduit d'opérations culturales nécessaires à sa production, est relativement compensée en Algérie par les cultures fourragères annuelles (foin en général) mais dont les coûts de production sont plus élevés par suite d'un plus grand nombre d'opérations culturales. Il faut à chaque année réaliser des opérations de labour-hersage-semis pour les cultures fourragères annuelles, alors qu'elles ne se font qu'une fois tous les 5 ans pour les prairies temporaires et quasiment jamais pour les prairies permanentes. A ces différences des coûts de production, s'ajoute aussi une maitrise insuffisante de l'itinéraire technique des cultures au niveau de la fertilisation, de la récolte et de la conservation qui agit négativement sur les rendements et la qualité des fourrages.

Pour ce qui est des racines et tubercules, leur usage à titre d'aliments pour le bétail est inexistant en Algérie. Ces produits, comme mentionné plus haut, ne deviennent rentables en tant que produit alimentaire pour les vaches laitières que s'il y a surplus de production par rapport à celle destinée à la consommation humaine ou s'ils subissent une première valorisation par l'industrie agroalimentaire. Ce n'est pas le cas pour l'Algérie qui ne dispose pas d'une industrie de transformation conséquente de ces produits et dont le niveau de production actuel n'est ajusté qu'en fonction du marché de la consommation humaine.

La production des aliments concentrés, énergétiques ou protéagineux, est intimement corrélée au niveau de la production céréalière et du développement de l'industrie agroalimentaire. Or pour les céréales, la production nationale ne couvre que le tiers de la consommation humaine et pour ce qui est des coproduits, ils sont totalement absents de l'offre alimentaire du fait d'une industrie de transformation incomplète et dépendante d'intrants semi-finis importés qui ne génèrent pas de sous-produits (huiles et sucre). Avec un tel déficit, la seule source de concentré se résume à l'importation.

Dans le tableau II.4 récapitulatif qui regroupe quelques ratios, le rendement fourrager de l'Algérie est faible. Il représente moins de la moitié de ceux des pays grands producteurs laitiers. Par contre l'efficacité de transformation du fourrage en lait (685 litres/tonne fourrage) paraît bizarrement très satisfaisante. Elle représente le double de celle de la France (340 litres/tonne fourrage), première puissance agricole européenne. Ce ratio est paradoxal avec le rendement algérien[12] lait/vache qui est environ de 4000 litres/an alors que le rendement français est autour de 9000 litres pour le même type de vache (Holstein et montbéliarde). Bizarrerie qu'il est difficile de commenter en l'absence de statistiques fiables. C'est comme si en Algérie, les vaches laitières deviennent si efficaces à transformer le fourrage qu'elles compensent par elles-mêmes la pénurie de celui-ci !!! C'est merveilleux !!! Mais tristement contradictoire avec ce que nous constatons sur le terrain !!! **Avons-nous les vrais chiffres de la production fourragère, de la production laitière et des rendements ???** Question cruciale à laquelle des réponses sérieuses doivent être apportées par nos institutions agricoles, afin que les leviers d'action puissent être identifiés de manière crédible.

Tableau II.1. Nature des aliments disponibles dans les pays producteurs laitiers et en Algérie

Aliments		**Mode de production**		**Utilisation comparative**	
				Pays laitiers (Europe …)	**Algérie**
Fourrage	Vert	Prairie permanente et temporaire		Généralisée	Marginale
	Foin	Prairie permanente et temporaire		Généralisée	Inexistante
		Culture fourragère annuelle (Vesce-avoine et autre)		Marginale	Relativement développée
	Ensilage	Prairie permanente et temporaire		Généralisée	Inexistante
		Culture fourragère annuelle	Maïs fourrager	Généralisée	En émergence
			Céréales immatures	Généralisée	En émergence
Racines et tubercules		Surplus de production ou sous-produit industriel		Généralisée	Inexistante
Aliments concentrés		Riches en énergie	Orge, maïs …	Généralisée	Importés
		Riches en azote	soja …	Généralisée	Importé
Coproduits		Dérivés des industries agroalimentaires	Tourteaux	Généralisée	Inexistants ou importés
			Marc de raisin	Marginale	Non utilisé
			Grignons d'olive	Inexistante	Non utilisés
			Issus de meunerie	Généralisée	Généralisée
		Dérivés d'une production agricole	Paille	Marginale	Généralisée
			Rebut de datte	Inexistante	Marginale

Disponible — Marginale ou en émergence — Non disponible ou importé

[12] Enquête auprès de 80 éleveurs dans la région de Tizi-Ouzou réalisée et présentée par Kadi Si Ammar dans un mémoire de magistère soutenu en juin 2007 à la Faculté des sciences agrovétérinaires et biologie de Blida. Il est vrai que la donnée est assez ancienne, mais il est peu probable qu'il y ait eu une variation significative des rendements de nos jours.

Tableau II.2. L'offre fourragère en chiffres dans des pays producteurs laitiers et en Algérie

Type d'aliments		France[13] (2018)		Est canada[14] 2018 (Québec)		Algérie[15] (2012)	
		10^3 ha	10^3 t	10^3 ha	10^3 t	10^3 ha	10^3 t
Prairie permanente	Toutes espèces	7139	31153			26	61
Prairie temporaire	Toutes espèces	2650	17099	961	3800		
	Jachère fauchée					249	670
Légumineuses	Luzerne déshydratée	68	691	???	???		
	Luzerne, trèfles, sainfoin et autres	358	2635	???	???	10	40
	Bersim					???	???
Graminées et légumineuses	Graminée + trèfle blanc	???	???	???	???		
	Vesce-avoine	???	???			491	1274
Culture fourragère annuelle	Maïs fourrager	1416	17084	69	2900	3	???
	Sorgho Céréales immatures Autres fourrages	276	1039			152	380
	Chou fourrager	2,3	108	???	???		
	Racines et tubercules	12,3	533	???	???		
Chaume						???	???
Paille						???	???
TOTAL		11922	**70343**	1030	**6700**	931	**2425**

Disponible Marginal ou en émergence Non disponible

Tableau II.3 : Structure de l'offre fourragère en chiffres dans des pays producteurs laitiers et en Algérie

	France		Québec		Algérie	
	10^3 ha	**%**	**10^3 ha**	**%**	**10^3 ha**	**%**
Fourrage à base d'herbe de prairie	9789	82,1	961	93,3	26	02,8
Maïs fourrager	1416	11,9	69	6,7	3	00,3
Légumineuses pures (dont luzerne)	426	03,6	???	???	10	01,1
Jachère fauchée ou pâturée	0		0		249	26,7
Cultures annuelles (vesce-avoine ou autre)	291	2,4	0	00,0	643	69,1
TOTAL	**11922**		**1030**		**931**	

Disponible Marginale ou indisponible

[13] Statistique agricole annuelle 2018-2019. Avril 2020 N°2. Ministère de l'Agriculture - France.
[14] Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire au Québec Édition 2019. Ministère de l'Agriculture et publication du conseil québécois des plantes fourragères. Juillet 2919 (Secteur fourrager québécois 2016).
[15] Par recoupement des données publiées par :
- R. ISSOLAH (les fourrages en Algérie : situation et perspectives de développement et amélioration. INRAA. CRP Mehdi Boualem. Laboratoire des Ressources Phytogénétiques. BP 37. Baraki. Alger. Algérie),
- S.KAOUCHE-ADJLANE (La filière laitière en Algérie. Etat des lieux et focus sur quelques contraintes de développement Département de Biologie, Université M'Hamed BOUGARA, Algérie)
- et Project REFORMA « Resilient, water- and energy-Efficient Forage and feed crops for Mediterranean Agricultural systems » (La culture de la luzerne dans un climat méditerranéen).

Tableau II.4. Récapitulation et quelques ratios des pays producteurs laitiers comparativement à l'Algérie

	France[16]	**Est-Canada (Québec)**[17]	**Algérie**[18]
Surface fourrage (10^3 ha)	11922	1030	931
Production fourragère (10^3 t)	70343	6700	2425
Production laitière en litres	23,8 milliard	3,33 milliard	1,66 milliard
≈ Tonne fourrage/ha	6	6,5	2,6
≈ Litres/tonne fourrage	340	495	685 ???
≈ Litres/ha fourrage	2000	3200	1785
Population	67 millions	8,5 millions	43 millions
Litres/habitant	355	390	38
Hectare fourrage/habitant	0,18	0,12	0,02

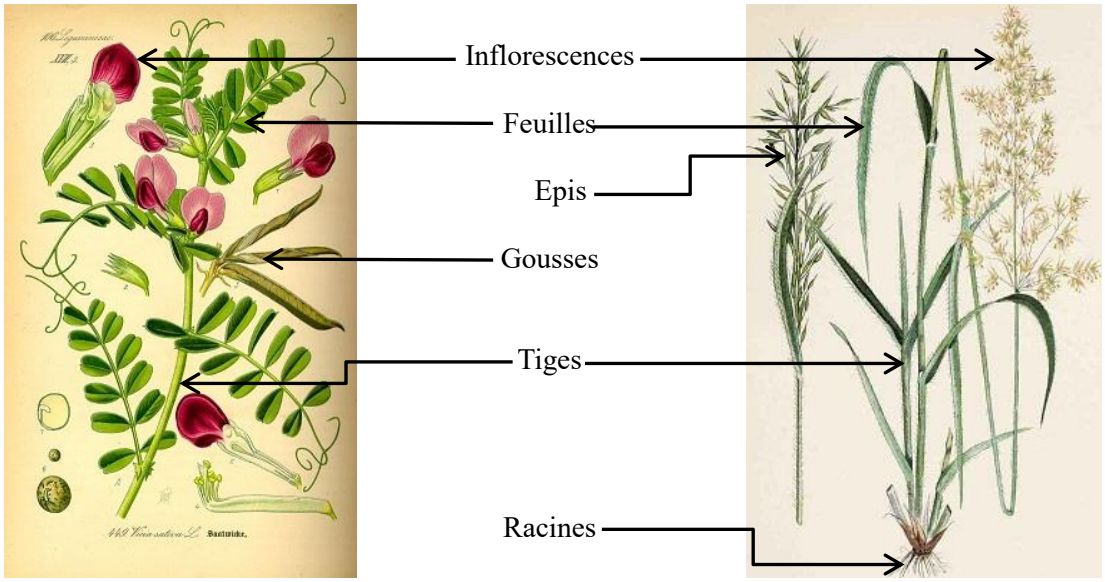
[16] Source : http : //www.filiere-laitiere.fr/fr/chiffres-cles/filiere-laitiere-francaise-en-chiffres

[17] Source : https : //lait.org/notre-organisation/portrait-production-laitiere-au-quebec/

[18] Source : En l'absence de statistique fiable, ce niveau de production est calculé par différence entre les besoins du marché national estimé à 4 945 000 000 litres (pour une consommation estimée à 115 l / habitant) et les quantités de poudre de lait importée en 2018 qui représentaient 432 000 tonnes (publié sur le bulletin « HORIZONS 9 avril 2019. Vol 16, N° 4 » du groupe hollandais HOOGWEGT group). Soit 3 283 200 000 litres à raison d'un taux de conversion de 7,6 litres pour 1 kg de poudre. Ce qui donne une production nationale estimée à 1 661 800 000 litres arrondie à 1 662 000 000 litres.

CHAPITRE III : Le fourrage

Le fourrage est une plante mais toutes les plantes ne sont pas des fourrages dans le sens où si un légume est une plante, toutes les plantes ne sont pas des légumes. C'est la même chose, et comme pour les légumes, il y a différentes sortes de fourrages qui varient selon leur morphologie et leurs apports (énergie, protéines...) Mais, malgré cette diversité, tous les fourrages présentent les même constituants que ceux d'une plante : tiges, feuilles et fleurs (fig. III.1), et les mêmes structures anatomiques et histologiques. Aussi pour bien savoir ce qu'est un fourrage et surtout comment bien le produire et bien l'utiliser, il est nécessaire de commencer par quelques rappels botaniques sur le fonctionnement et la constitution d'une plante. Ce rappel est important car il existe un lien entre la qualité d'un fourrage et l'état des cellules qui le constitue (variable selon la composition de leurs parois dite pecto-cellulosiques) d'une part, et d'autre par la nature de ses tissus (de soutien, de réserve …)



Vesce **Avoine**

Figure III.1 : Un fourrage mais deux espèces et morphologies distinctes

1. Le fourrage est une plante : Que contient-il ?

En pesant une plante fraichement coupée, on obtient son poids frais qu'on va noter PF. Si on effectue une deuxième pesée après l'avoir laissé sécher, on obtient un autre poids inférieur au premier. Celui-ci représente le poids de la matière sèche de la plante, qu'on notera MS. La différence entre les deux poids est représentée par le poids de l'eau qui s'est évaporée, de telle sorte qu'on peut écrire :

$$\mathbf{MS = PF - eau\ évaporée}$$

Si on chauffe encore cette matière sèche jusqu'à calcination, on obtient un résidu formé de matières minérales (calcium, phosphore, potassium, nitrates …), qu'on appelle aussi cendre, indestructible par la chaleur et d'un poids encore inférieur à la masse sèche de départ. On notera ce résidu MM pour matières minérales. La masse qui a disparu lors de la calcination est appelée matière organique (MO) et on peut connaitre son poids par différence entre MS et MM :

$$\mathbf{MO = MS - MM}$$

A ce stade on constate qu'une plante est constituée d'eau, de matière organique et de matières minérales. L'analyse plus fine de la matière organique, met en évidence trois composantes : des sucres (glucides), des matières azotées (protéiniques et non protéiniques) et des graisses (lipides). Au final, on dira donc qu'une

plante est constituée de glucides, lipides, matières azotées, matières minérales et d'eau. Mais comme l'eau et un agent neutre en alimentation, elle ne fait ni grossir ni maigrir, on ne considèrera plus dans ce qui suit que les quatre éléments précédents. Et comme le fourrage est une plante on peut dire :

Fourrage = Glucides + Matières azotées + Lipides + Matières minérales

Tous les aliments sont constitués par ces quatre composants, qu'on appelle aussi nutriments[19]. Réussir une bonne alimentation c'est fournir à la vache laitière une ration contenant l'ensemble de ces nutriments de manière équilibrée et suffisante.

2. Chez les plantes tout commence par la photosynthèse

Comment la plante produit ces nutriments ? Mise à part les matières minérales qui sont puisées directement dans le sol par les racines, la matière organique (glucides, matières azotées et lipides) est fabriquée totalement par la plante. Celle-ci commence d'abord à fabriquer du sucre (**glucides**) par un mécanisme naturel extraordinaire qui s'appelle la **photosynthèse** et qui permet aux plantes d'utiliser la lumière solaire pour fabriquer de la matière organique. Grâce à la chlorophylle qui donne la couleur verte aux végétaux, les feuilles de la plante captent **l'énergie de la lumière** ou les **photons**[20] comme disent les physiciens et l'utilisent pour briser les molécules[21] d'eau (H_2O) puisées dans le sol par les racines. Une fois cette molécule brisée, elle libère l'oxygène dans l'atmosphère et combine l'hydrogène au gaz carbonique de l'air absorbé par les stomates[22] de la feuille. Il en résulte la production d'un sucre, le **glucose** dont la formule chimique est $\mathbf{C_6H_{12}O_6}$. Une partie du glucose formé sera transformée en molécules appelées ATP[23] pour fournir l'énergie dont la plante a besoin pour ses fonctions vitales et une autre partie sera stockée dans les tissus de la plante (amidon …) ou servira à produire de la matière azotée (**acides aminés**, **protéines** …) en se combinant avec l'azote (N) puisé dans le sol par les racines.

3. Le complexe feuille-tige-racine

La photosynthèse se déroule dans la feuille et plus précisément dans certains de ses tissus appelés **parenchyme chlorophyllien**. La tige fait office de voie de communication entre les feuilles et les racines. Les feuilles agissent comme capteurs de lumière et de gaz carbonique (CO_2) pour la synthèse des sucres et les racines captent l'eau et les éléments minéraux du sol qui seront acheminés aux feuilles via la tige pour la synthèse des protéines. L'eau chargée de sels minéraux, qui remonte des racines aux feuilles est appelée **sève brute**. Une fois que cette sève brute arrive au niveau des feuilles, elle cède une partie de son eau et sels minéraux et s'enrichit par les nouveaux éléments formés directement ou indirectement par la photosynthèse (sucres, protéines …). Cette nouvelle sève, appelée **sève élaborée**, refait le chemin inverse de la sève brute dans la tige et se répand dans l'ensemble de la plante (racines, bourgeons, fleurs, graines, fruits…). Les deux types de sève, circulent dans la tige dans deux circuits distincts. La sève brute remonte des racines aux feuilles par ce qu'on appelle les **vaisseaux du xylème** et la sève élaborée qui fait le trajet inverse passe par les vaisseaux dits du **phloème**. On voit donc que cette dynamique, photosynthèse et circulation de la sève dans la plante, schématisée dans la figure III.2, met en jeux différentes parties de cette dernière ou disons

---

[19] Un **nutriment** est une substance fournie par l'alimentation et utilisée par l'organisme pour sa construction et son fonctionnement.

[20] Les **photons** sont des «paquets» d'énergie dite élémentaire, qui sont échangés lors de l'absorption ou de l'émission de lumière par la matière. Par exemple, en chauffant un morceau de métal, on s'aperçoit que celui-ci change de couleur et émet une lumière. Cette lumière constitue une émission d'énergie sous forme de photons qui permet au métal d'évacuer le trop plein d'énergie thermique qu'il a reçu pour être porté à incandescence. C'est par un phénomène similaire que le soleil nous envoie des photons jusqu'à la terre.

[21] Une **molécule** est un ensemble d'atomes (au moins deux) identiques ou non, unis les uns aux autres par le biais de liaisons chimiques.

[22] Un **stomate** est un orifice de petite taille présent dans l'épiderme de la face inférieure des feuilles le plus souvent. Il permet les échanges gazeux entre la plante et l'air (oxygène, gaz carbonique, vapeur d'eau...). Il est considéré comme un organe qui constitue chez les plantes une interface entre l'atmosphère externe et le réseau gazeux interne de la même manière que les racines constituent une interface entre l'eau du sol et le réseau interne de distribution de la sève dans la plante.

[23] **ATP** : Adénosine triphosphate. C'est une molécule découverte par le biochimiste allemand Karl LOHMAN. Elle fournit l'énergie nécessaire à l'activité cellulaire et à toutes les réactions chimiques qui s'y déroulent pour permettre à la plante de se maintenir en vie et fabriquer ses tissus. Elle agit comme un carburant qui permet aux voitures de se mouvoir. Cette molécule, également présente chez tous les êtres vivants, permet chez les animaux et les êtres humains, au cœur de battre, au cerveau de fonctionner, aux poumons de ventiler et aux muscles de se contracter.

différents tissus : le **parenchyme** pour la synthèse chlorophyllienne, les vaisseaux du **phloème** et du **xylème** pour le transport de la sève et du tissu dit de soutien appelé aussi **sclérenchyme** qui comble les vides entre les vaisseaux dans la tige et qui assure le port érigé de la plante.

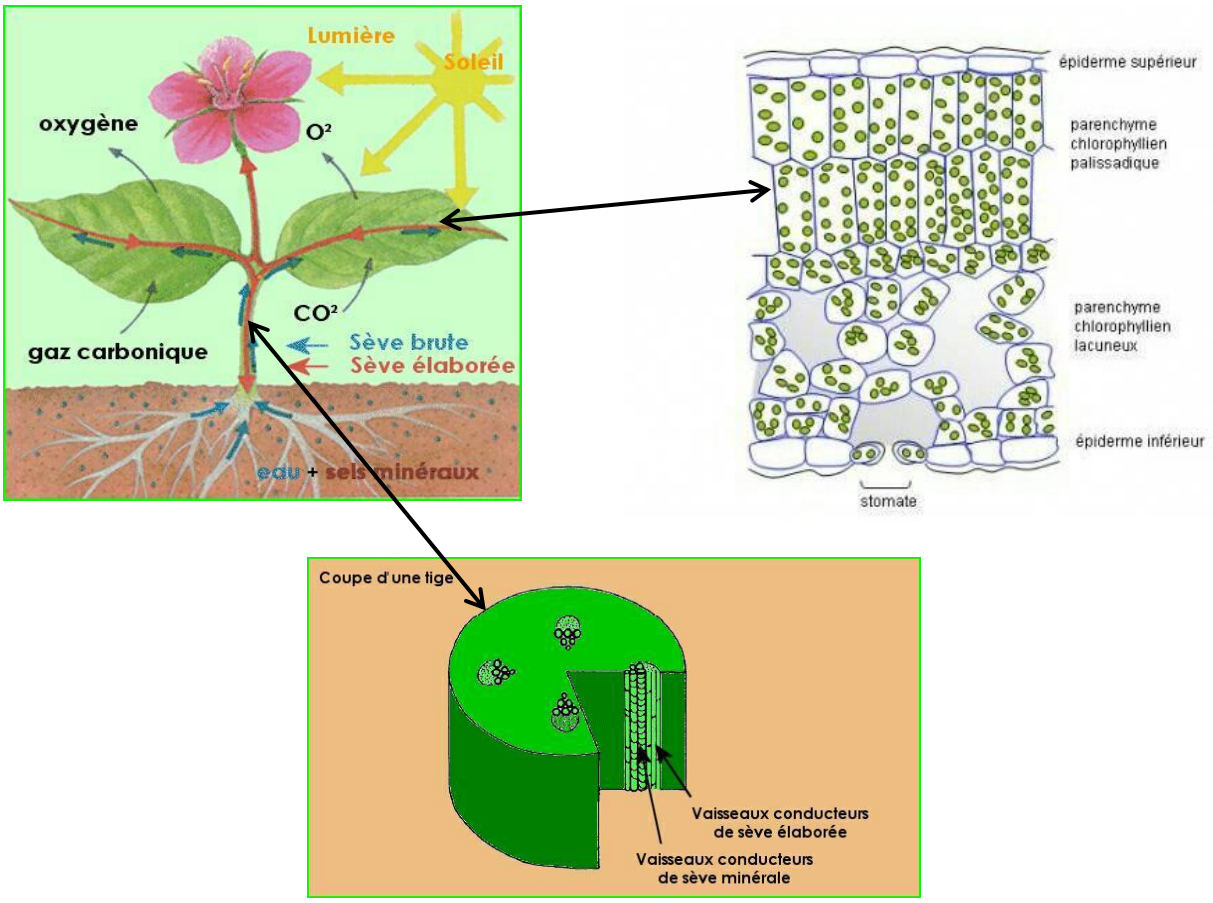


Figure III.2 : Structure anatomique et histologique d'une plante

4. La cellule végétale et la paroi pecto-cellulosique

Nous avons jusque-là évoqué les différents organes de la plante, feuilles, tiges, racines… et les tissus qui les constituent. Approfondissons un peu plus notre observation sur comment sont constitués les tissus. Comme tout être vivant, une plante est constituée de cellules. Celles-ci sont les plus petits éléments vivants d'un organisme. Elles se multiplient et se rassemblent en ensembles homogènes et différenciés les uns des autres pour former les différents organes de la plante : tiges, feuilles, racines, fleurs et leurs tissus respectifs.

Les cellules végétales se distinguent des cellules animales par trois particularités (fig. III.3). Elles sont entourées par une paroi extérieure, désignée par le nom de **paroi pecto-cellulosique** et contiennent des **chloroplastes**, siège de la photosynthèse et une **vacuole** pour le stockage de l'eau et des produits de dégradation issus du métabolisme secondaire[24] (ions[25], sucres, dérivés azotés …). Les autres constituants

[24] On définit deux types de métabolisme, **primaire** et **secondaire**. Le métabolisme primaire est capital pour la vie. On y distingue d'une part l'**anabolisme**, qui représente les réactions de synthèse des constituants cellulaires (glucides, lipides, protéines …), et d'autre part le **catabolisme**, qui représente les réactions de dégradation de ces constituants cellulaires en petites molécules pour en libérer l'énergie (glucose) ou pour rebâtir d'autres constituants cellulaires (acides aminés, protéines ...). Le métabolisme secondaire quant à lui n'est pas essentiel à la vie. Son rôle est de synthétiser des molécules dont on ne sait pas toujours à quoi elles servent (parfum, tanins, pigments …) mais qui en général permettent à la plante de développer des capacités adaptatives à l'environnement. C'est par cette voie par exemple que sont produites des molécules utilisées dans l'industrie pharmaceutique.

(**noyau**, **mitochondries**, **ribosomes** …) sont pareils. Le tout baigne dans une substance d'apparence gélatineuse appelée **cytoplasme**, constitué d'environ 80% d'eau et de divers composés organiques[26] et minéraux.

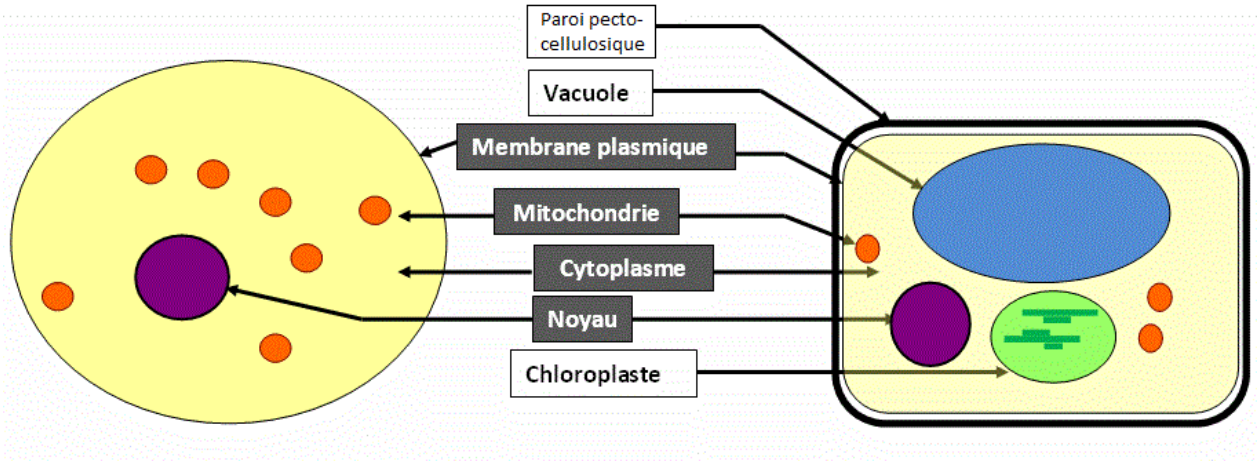


Figure III.3 : Schéma comparatif des structures cellulaires animales (à gauche) et végétale (à droite) (Source : http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/IMG/compar.gif)

L'étude de la **paroi pecto-cellulosique** et de sa formation conduit à distinguer trois parties qui se forment successivement : la lamelle moyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire (fig. III.4).

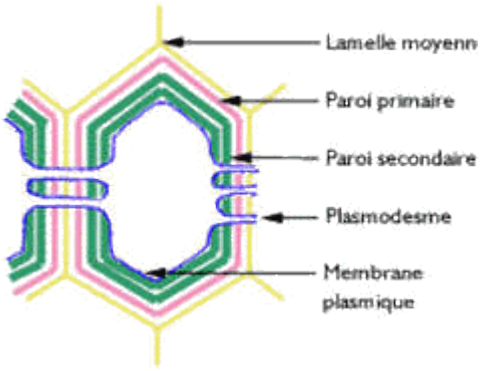


Figure III.4 : Structure de la paroi pecto-cellulosique (Source : http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/biologie-physiologie-vegetale/chap1b/Chapitre-2/Section-2-2.html)

La lamelle moyenne est la partie la plus externe de la paroi et elle est commune à deux cellules contigües. C'est elle qui se forme la première et elle est constituée de **matières pectiques**[27].

La paroi primaire est caractéristique des cellules végétales jeunes comme celles qui constituent les tissus du parenchyme. Elle leur confère une certaine souplesse qui leur permet de croître et de se diviser. Elle mesure de 1 à 3 microns d'épaisseur et son élaboration se fait à partir du cytoplasme vers la lamelle moyenne (fig. III.5). Elle est constituée de petites fibres de **cellulose**[28] (microfibrilles) disposées sans ordre dans une matrice constituée de pectines, d'hémicellulose et de protéines.

---

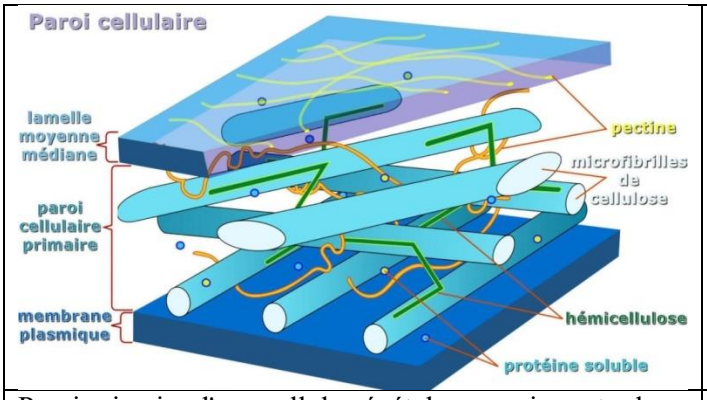
[25] L'ion est un atome ou une molécule portant une charge électrique. On distingue deux catégories d'ions : les cations chargés positivement, et les anions chargés négativement.

[26] En chimie ou biochimie, l'adjectif **organique** qualifie ce qui a trait à la constitution du vivant. Par opposition à une molécule minérale, par exemple l'eau (H_2O), les molécules organiques, comme celle des sucres ($C_6H_{12}O_6$) ou des protéines (H_2N–HCR–COOH) contiennent toujours du carbone (C).

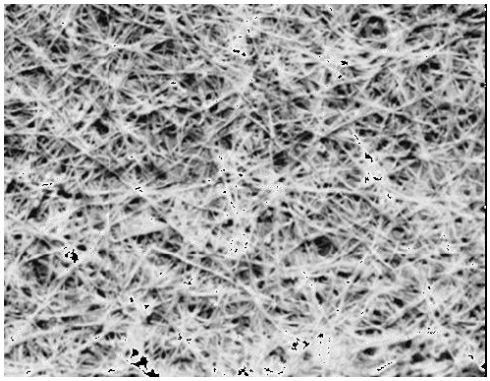
[27] Relatives à la pectine. Composé glucidique, connu des cuisiniers pour ses propriétés gélifiantes, utilisé dans la confection des confitures.

[28] La cellulose est un glucide. Elle constitue une fibre très abondante qui rentre dans la fabrication du papier entre autre.

La paroi secondaire est caractéristique des cellules âgées ou des cellules mortes. Elle est appliquée contre la paroi primaire et se développe vers l'intérieur de la cellule (fig. III.6). Elle est constituée par les mêmes éléments que ceux de la paroi primaire auxquels se rajoute la **lignine**[29]. Celle-ci lui confère une rigidité qui ne permet plus la croissance cellulaire. Elle peut atteindre une forte épaisseur dans certains tissus, comme ceux des vaisseaux conducteurs de sève (**xylème**) ou de soutien (**sclérenchyme**). Comme dans la paroi primaire, les microfibrilles de cellulose de la paroi secondaire baignent dans une matrice mais ici, elles sont disposées de façon régulière en strates successives dans lesquelles le sens d'orientation change d'une strate à l'autre (Fig. III.7) comme dans une feuille de contre-plaqué. Ce complexe cellulose / lignine de la paroi secondaire est comparable au béton armé (toutes proportions gardées). La cellulose comme l'armature en acier, assure la souplesse et la lignine, la rigidité comme le ferait le béton. La part des tissus lignifiés augmente avec l'âge de la plante ou sous l'effet de certains facteurs environnementaux (stress hydrique…) et aura un impact négatif sur la digestibilité du fourrage comme on le verra plus loin.

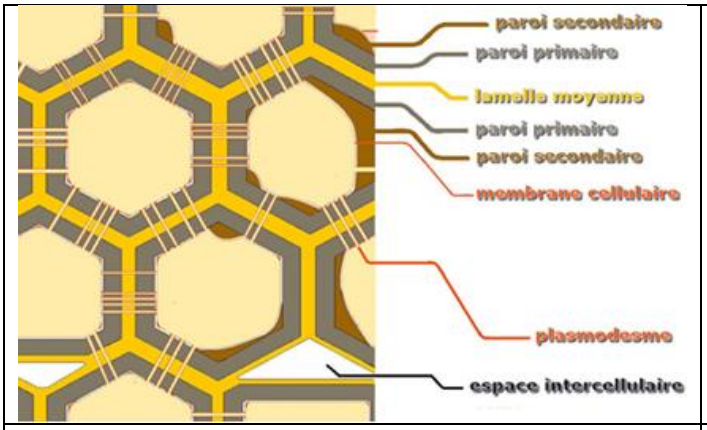


Paroi primaire d'une cellule végétale comprise entre la membrane plasmique et la lamelle moyenne[30]

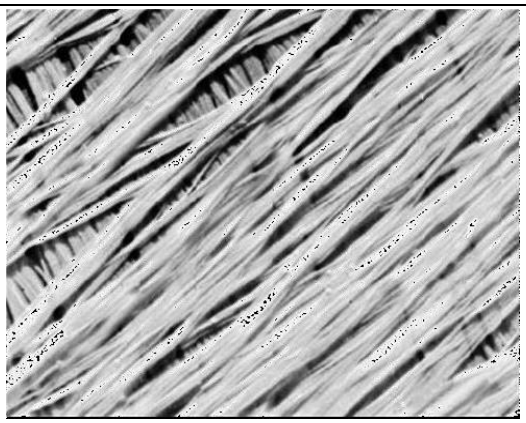


Microfibrilles de cellulose de la paroi primaire disposées sans ordre[31] (microscope électronique)

Figure III.5 : Structure de la paroi primaire d'une cellule végétale



Paroi secondaire appliquée contre la paroi primaire et se développant vers l'intérieur de la cellule[32]



Microfibrilles de cellulose de la paroi secondaire disposées en strates régulières successives (microscope électronique)

Figure III.6 : Structure de la paroi secondaire d'une cellule végétale

[29] La lignine est un des principaux composants du bois.
[30] Source : https://www.aquaportail.com/definition-5062-lamelle-moyenne.html
[31] Source : La paroi végétale, Cours 2 présentée par M.BOUDJEMLINE
[32] Source : https://www.aquaportail.com/definition-5069-paroi-secondaire.html

5. Application au fourrage

Lorsque une vache ingère du fourrage, elle mange une plante avec **feuilles**, **tiges** et parfois **racines** et tous les tissus qui les composent, **parenchyme**, **sclérenchyme**, **xylème.** Tous ces composants se mélangent dans son appareil digestif mais ne se digèrent pas de manière égale. L'épaisseur et la composition de la paroi pecto-cellulosique varient selon la répartition des cellules dans les tissus et l'âge de la plante. Les unes seront plus riches en cellulose et d'autres plus riches en lignine qui réduit la digestibilité du fourrage. Donc quand une vache mange du fourrage, elle ingère différents tissus de la plante dont certains seront plus nutritifs que d'autres (fig. III.7). On peut dire alors que la valeur nutritive d'un fourrage est représentée par la moyenne des valeurs nutritives de ces différentes parties. Si un fourrage a été récolté jeune, il y aura des tissus contenant beaucoup de cellules à parois cellulosiques peu lignifiées comme dans le parenchyme par exemple et donc bien digestible, par contre s'il est récolté plus vieux, il y aura plus de tissus de soutien ou conducteurs (sclérenchyme, xylème …), riches en lignine et peu ou pas digestibles par la vache.

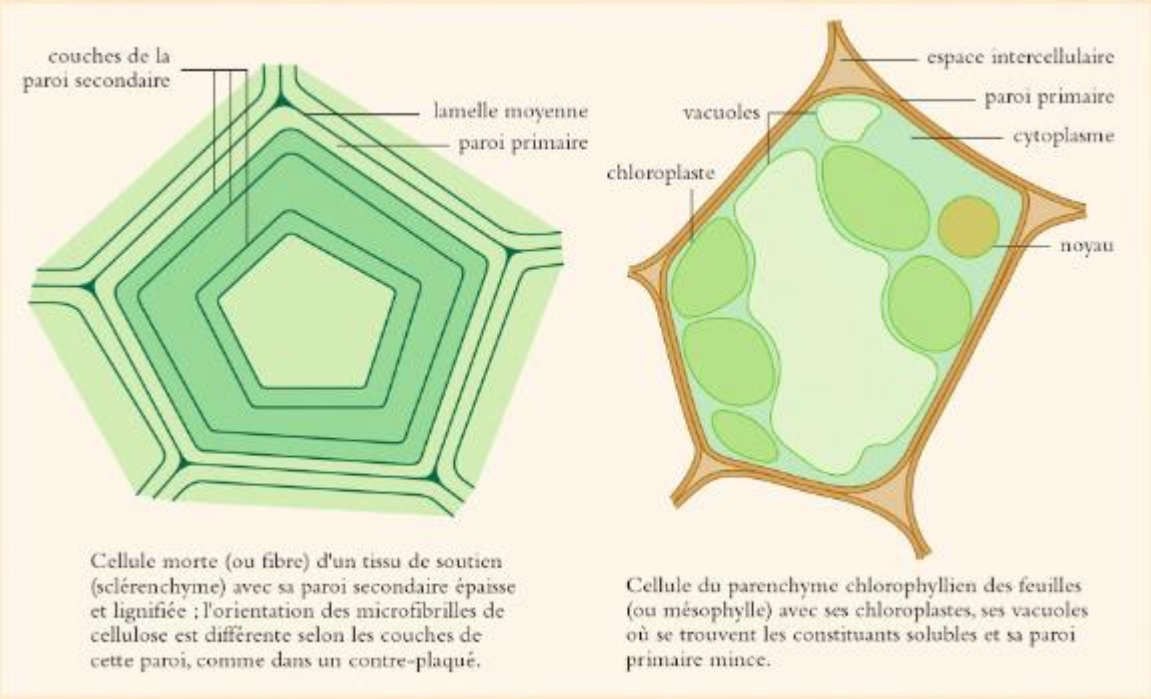


Figure III.7 : Représentation schématique des deux types de cellules les plus importantes pour la valeur nutritive des fourrages (source[33] : R. JARRIGE et *al*, Alimentation des bovins, ovins et caprins. INRA édition 1988)

6. Les nutriments des fourrages

Dans le premier paragraphe de ce chapitre, nous avons défini le fourrage par l'équation suivante :

Fourrage = Glucides + Matières azotées + Lipides + Matières minérales

Ces nutriments se logent dans les cellules et leurs proportions varient dans la plante selon les tissus et les compartiments de la cellule considérés (noyau, cytoplasme et paroi pecto-cellulosique). C'est la raison pour laquelle, nous avons insisté dans ce qui précède sur la description des tissus de la plante et des différents types de cellules qui les composent. Ce survol botanique nous permet de comprendre comment ces éléments se répartissent dans la cellule et de quelle manière la vache en tire profit grâce à son système digestif particulier en tant qu'animal polygastrique[34]. Il nous permettra également de comprendre plus loin, les

[33] Cité dans L. DELTEIL et *al* : Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Tome 1. Educagri Editions. 2018.
[34] Animal à plusieurs poches d'estomac contrairement aux animaux monogastrique qui ne sont pourvus que d'une seule poche.

principes de l'analyse fourragère, ce qui détermine la valeur alimentaire d'un fourrage, quels sont les éléments qui sont analysés et comment les interpréter.

7. Les glucides

C'est par la consommation des sucres (ou glucides) que les êtres vivants couvrent leurs besoins en énergie. Autrement dit, les sucres sont le carburant qui permet aux êtres vivants de se mouvoir, de maintenir la chaleur de leur corps, de travailler, etc. Sans sucres une vache ne pourra ni produire du lait ni même se tenir debout ou marcher. On distingue deux catégories de glucides selon leur localisation dans la cellule végétale : **Les glucides cytoplasmiques** (localisés au niveau du cytoplasme) ou encore dits glucides intra cellulaires et **les glucides pariétaux** (qui se localisent dans la paroi cellulaire).

7.1. Les glucides cytoplasmiques ou intra cellulaires

Comme leur nom l'indique, **les glucides cytoplasmiques ou intra cellulaires** se localisent à l'intérieur de la cellule, dans la partie qu'on a désigné par le nom de cytoplasme. Ces glucides sont dits **des sucres hydrosolubles** (saccharose, maltose …) c'est-à-dire solubles dans l'eau, bien que certains ne le soient pas totalement comme l'amidon et présentent la propriété d'être rapidement digérés par la vache. Celle-ci possède dans son appareil digestif, **les enzymes**[35] nécessaires à leur dégradation. Mais ils ne représentent que 10% seulement de la matière sèche des fourrages. Donc pour compléter la couverture de ses besoins en énergie, la vache doit accéder au 90% restant qui sont contenus dans les parois cellulaires et qu'on désigne par l'expression de **glucides pariétaux**. C'est pourquoi les parois cellulaires sont importantes à considérer dans le cas des fourrages.

7.2. Les glucides pariétaux

Les glucides pariétaux aussi appelés **fibres** (par référence à la structure de la cellulose en microfibrilles) sont les constituants des parois cellulaires (moyenne, primaire et secondaire). On distingue, des glucides proprement dits qui sont au nombre de trois : **cellulose, hémicellulose et pectine** - et un constituant non glucidique qui leur est associé : la **lignine**. Cette dernière, est une substance indigestible pour les vaches et elle rend la cellulose et les hémicelluloses, auxquelles elle s'associe, inaccessibles aux enzymes de digestion. La teneur en lignine d'un fourrage est le principal facteur de variation de sa digestibilité. Un fourrage riche en lignine est très pauvre au plan nutritif.

8. Les matières azotées

L'azote joue un rôle capital dans la constitution et l'entretien des êtres vivants. Sans azote, il n'y a pas de vie. Il existe deux formes d'azote, l'une minérale : ammonium (NH_4^+) et nitrates (NO_3^-), répandue dans la nature et l'autre organique (acides aminés, protéines) qui constitue les tissus des organismes vivants (micro-organismes, plantes, animaux). Seules les micro-organismes et les plantes sont capables de transformer l'azote minéral en composés organiques azotés (protéines). Les vaches, comme tous les animaux sont incapables d'utiliser (du moins directement) l'azote minéral. Elles construisent leurs protéines à partir de celles contenues dans les végétaux dont elles se nourrissent.

Les matières azotées chez les plantes, aussi appelés protéines brutes, ne se différentient pas comme les glucides en fonction de leur localisation dans la cellule (cytoplasme et parois) mais selon leur nature chimique et leur composition. On peut les trouver indifféremment dans le noyau, le cytoplasme et dans les parois. On distingue deux catégories : les matières azotées protéiques et les matières azotées non protéiques.

8.1. Les matières azotées protéiques

Les matières azotées protéiques comprennent les acides aminés libres, les peptides et les protéines.

Les acides aminés sont de petites molécules qui forment les éléments de base entrant dans la constitution des protéines. Alors que les molécules de sucre sont formées essentiellement par trois atomes[36] (carbone, hydrogène et oxygène), il se rajoute à la molécule des acides aminés, de l'azote. Il existe une vingtaine

[35] Les enzymes sont des molécules capables de catalyser des réactions chimiques c'est-à-dire les accélérer ou les diriger dans un sens privilégié.
[36] Les **atomes** sont les constituants élémentaires de toutes les substances solides, liquides ou gazeuses.

d'acides aminés qui diffèrent entre eux par la séquence et l'agencement de leurs atomes de base (carbone, hydrogène, oxygène et azote).

Les protéines sont formées par des acides aminés qui se lient les uns autres. A partir d'une centaine d'acides aminés liés, la molécule ainsi formée prend le nom de **protéine**. A moins de cent acides aminés, la molécule est désignée par le nom de **peptide**. Les protéines sont donc de grosses molécules constituées par un assemblage de molécules d'acides aminés. Chaque acide aminé confère à la protéine des propriétés chimiques spécifiques, et l'ordre d'assemblage lui donne une fonction[37] précise.

8.2. Les matières azotées non protéiques

Les matières azotées non protéiques font référence à un azote dénué de protéines. Il existe deux catégories : les composés azotés organiques et les composés azotés minéraux.

Dans les **composés azotés organiques** on distingue encore l'azote organique simple et les bases azotées.

- l'**azote organique simple** n'est ni sous forme d'acide aminé ni sous forme de protéines. Il est considéré appartenant encore au monde des molécules organiques par le fait que sa molécule contient encore du carbone comme les amides (urée[38]) et les amines.
- Les **bases azotées** aussi appelées **acides nucléiques**, sont situées dans le noyau de la cellule et rentrent dans la composition de l'ADN[39] et de l'ARN[40].

Les **composés azotés minéraux** sont des formes azotées simples non organiques dont la molécule ne contient pas de carbone. Il s'agit d'ions comme les nitrites (NO_2^-), les nitrates (NO_3^-) ou l'ammonium (NH_4^+), qui s'accumulent dans la vacuole de la cellule.

9. Les lipides

Les lipides sont de grosses molécules formées par l'assemblage de plusieurs autres molécules plus petites appelées acides gras[41] comme le sont les protéines avec les acides aminés. Ils sont dans des proportions moins grandes dans les fourrages (3 à 5% de la MS) par rapport aux glucides et aux protéines. Ils rentrent dans la composition de la cire (cérides) qui recouvre les feuilles et dans la constitution des membranes cellulaires sous forme de molécules appelées phospholipides car contenant du phosphore. On les retrouve aussi et surtout comme réserve dans les graines (glycérides).

10. Les matières minérales

Les matières minérales jouent un rôle important dans la vie de la cellule et se distribuent sur plusieurs sites de celle-ci. La liste est longue et on se contentera de citer les principaux éléments minéraux qui jouent un rôle majeur dans l'alimentation de la vache et qui ne devraient pas faire défaut dans ses repas. On distingue les éléments minéraux selon deux groupes : les macroéléments et les oligoéléments.

Les macroéléments sont les éléments qu'on retrouve en quantité importante dans les fourrages. Appelés simplement les « minéraux» ils sont constitués essentiellement par le calcium, le phosphore, le potassium, le magnésium et le soufre.

Les oligoéléments avec *oligo,* du grec ancien qui veut dire peu abondant sont constitués principalement par le fer, le cuivre, le manganèse, le bore … etc. … On les trouve en très petite quantité ou pratiquement à l'état de traces dans la plante.

---

[37] On peut imaginer les acides aminés comme des lettres de l'alphabet. « Cela prend 26 lettres pour écrire tous les mots de la langue française, comme cela ne prend que 20 acides aminés pour fabriquer toutes les protéines » (H. LAPIERRE).

[38] L'**urée** est une molécule qui résulte d'un processus de dégradation des protéines.

[39] L'**ADN** ou **acide désoxyribonucléique** est une macromolécule présente dans le noyau des cellules. Il contient l'information génétique, appelée génome, permettant le développement, le fonctionnement et la reproduction de tous les êtres vivants. L'ADN est organisé en structures appelées chromosomes.

[40] L'**ARN** ou **acide ribonucléique** est une copie d'une région d'un brin de l'ADN. Les cellules utilisent l'ARN comme un support intermédiaire des gènes pour synthétiser les protéines dans le cytoplasme.

[41] Un **acide gras** est une molécule formée d'une chaîne de carbones liés à des hydrogènes et terminée par un groupement acide constitué de carbone, d'oxygène et d'hydrogène qu'on note COOH.

11. Récapitulation

Au terme de ce long exposé, un peu compliqué des fois, il est possible d'exprimer dans le tableau ci-après une sorte de «**formule générale développée d'un fourrage**» en complément de celle simplifiée présentée en début de ce chapitre.

Tableau III.1. Les constituants d'une plante ou formule générale développée d'un fourrage[42]

FOURRAGE

=

GLUCIDES + MATIÈRES AZOTÉES + LIPIDES + MATIÈRES MINÉRALES + EAU

=

FOURRAGE	**Eau**					Eau
	Matière sèche	**Matière organique**	**Glucides**	**Glucides cytoplasmiques** (aussi dits sucres solubles)		glucose, fructose, maltose, saccharose, amidon
				Composés pariétaux	**Composés glucidiques**	cellulose, hémicellulose, pectine
					Composé non glucidique	lignine
			Matières azotées totales	**Matières azotées protéiques**		acides aminés, peptides, protéines
				Matières azotées non protéiques	**Composés azotés organiques**	amides (urée), amines, bases azotées
					Composés azotés minéraux	nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-), ammonium (NH_4^+)
			Lipides	**Lipides**		phospholipides, glycérides, cérides …
		Matières minérales	**Macroéléments**			calcium, phosphore, potassium
			Oligoéléments			fer, cuivre, manganèse …

On pourrait rajouter aussi **«vitamines»**. Mais pour éviter d'alourdir le texte, la question des vitamines sera abordée au chapitre X pour la situer dans un contexte plus pratique que théorique.

[42] Les espaces grisés dans le tableau représentent les éléments dosables par l'analyse fourragère (chapitre XI)

CHAPITRE IV : Le système digestif et la digestion des aliments chez la vache laitière

1. Anatomie du tube digestif de la vache laitière

Contrairement aux monogastriques[43], dont nous faisons partie, chez la vache laitière, la nourriture transite par trois "pré-estomacs" : le rumen (ou panse), le réseau (ou bonnet) et le feuillet, avant d'aboutir dans «**la caillette**». C'est cette dernière poche qui constitue le vrai estomac équivalent à celui des monogastriques. Le contenu des trois « pré-estomacs » représente 70 à 75% du contenu total du tube digestif de la vache dont une vue simplifiée est présentée ci-après.

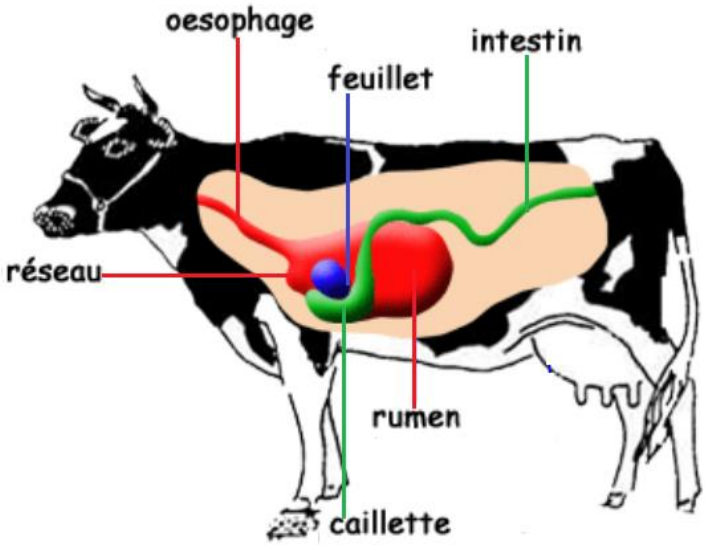


Figure IV.1: Représentation schématique du tractus digestif de la vache laitière

Le rumen est le plus volumineux des pré-estomacs (environ 100 à 150 litres chez une vache adulte) et il représente plus de 80% de leur volume total. Il est le premier lieu de réception des nutriments qui proviennent à la fois de l'ingestion des aliments, de la rumination, ainsi que du recyclage de l'urée apportée par la salive (fig. IV.I et IV.3).

Le réseau aussi appelé réticulum ou bonnet, constitue la plus petite poche des quatre compartiments. Il assure la continuité de la fermentation.

Le feuillet aussi appelé omasum, constitue la troisième poche du système digestif. Il reçoit le contenu ruminal qu'il presse pour en absorber l'eau avant son passage dans la caillette.

La caillette, avec une capacité de 10 litres environ, équivaut pour une vache, adulte à l'estomac vrai d'un monogastrique. C'est là que s'effectue la digestion proprement dite. Celle-ci contient de l'acide gastrique et des enzymes semblables à celles qui existent dans l'estomac d'un monogastrique.

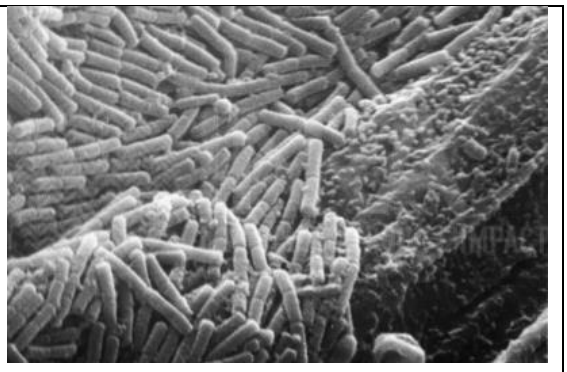
2. Le rumen est une poche habitée par des milliards de micro-organismes

Les conditions ambiantes dans le rumen se caractérisent par une très forte humidité (85 à 90% d'eau), un milieu très légèrement acide à neutre (pH 6,5 à 7), une température moyenne entre 39 et 40°C et l'absence d'oxygène. Ces conditions sont propices à la présence et au développement d'une importante flore microbienne anaérobie[44] composée de bactéries, de champignons et de protozoaires (fig. IV.2) avec laquelle la vache entretient des relations symbiotiques[45]. Grâce à ces micro-organismes elle est capable de digérer la

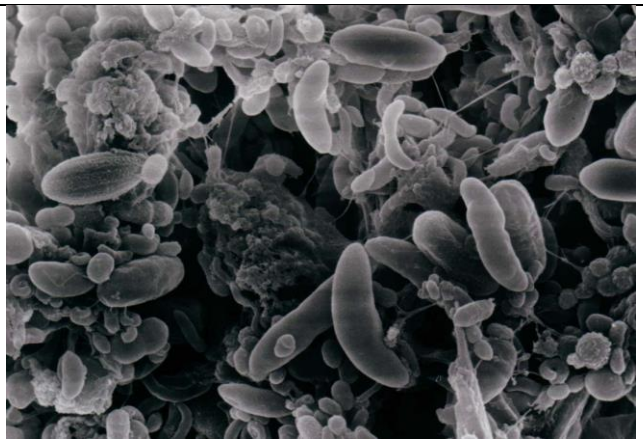
[43]Les animaux qui se nourrissent principalement de viande ou les omnivores comme les humains possèdent un estomac composé d'une seule poche. Ce sont des monogastriques.
[44] Qui peut vivre en absence d'oxygène.
[45] Une relation symbiotique est différente de la relation parasite. Dans cette dernière, la relation est à l'avantage du parasite seulement (exemple ver parasite), alors que dans la relation symbiotique, il y a un échange mutuellement avantageux entre l'hôte et l'hébergé

cellulose et des formes simples d'azote par un processus de fermentation (voir explications plus loin) qui se déroule dans le rumen. Ces micro-organismes sont d'une importance vitale pour la vache. Sans eux, elle est incapable, en tant qu'herbivore de dégrader la cellulose pour couvrir ses besoins énergétiques et d'utiliser toutes les matières azotées des fourrages pour ses besoins en protéines.

A/ Source : https://lallemandanimalnutrition.com/fr/



B/ Bactéries adhérentes à la paroi du rumen
(http://mediatheque.inra.fr/media/detail/171215/private)



C/ Protozoaires mélangés avec d'autres micro-organismes.
(source : https://www.intechopen.com/books/probiotic-in-animals/protective-effect-of-probiotics-strains-in-ruminants)

D/ Champignons sur des pellicules de soja
(source : JOUANY J.P. Les fermentations dans le rumen et leur optimisation. INRA. Prod. Anim., 1994, 7(3), 207-225.

Figure IV.2 : Vue au microscope des micro-organismes vivant dans le rumen

3. Les micro-organismes du rumen ne respirent pas : ils fermentent

Tous les êtres vivants ont besoin de respirer pour vivre. Mais alors, comment font les micro-organismes (bactéries, protozoaires …) dans le rumen puisqu'ils baignent dans un milieu complètement dépourvu d'oxygène. Et bien c'est juste qu'ils utilisent une autre manière de faire, appelée **fermentation** qui leur permet de se passer d'oxygène.

3.1. La fermentation c'est quoi ?

La fermentation comme la respiration cellulaire[46] est un ensemble de réactions chimiques qui se déroulent à l'intérieur de la cellule pour transformer les sucres en énergie. Une compréhension facile de la fermentation, nécessite, à mon sens un rappel sur la respiration et ce qui distingue la fermentation de cette dernière.

(exemple les bactéries fixatrices d'azote sur les racines de la luzerne).

[46] La **respiration cellulaire** est l'ensemble des réactions métaboliques qui permet aux cellules des organismes vivants supérieurs (plantes, animaux) de produire de l'énergie à partir de la dégradation des sucres contenus dans leur alimentation. Ce qu'on appelle communément «la respiration» (inspiration d'oxygène et expiration de gaz carbonique par les poumons) ne constitue en réalité que la

Les plantes, les animaux, les bactéries … etc. … ont besoin d'énergie pour vivre. Ils utilisent pour cela, des molécules organiques comme les sucres (principalement le glucose) mais aussi des acides gras ou des acides aminés comme carburant. En se combinant avec d'autres atomes (hydrogène, oxygène ou azote), le carbone des molécules dites organiques crée des liaisons chimiques riches en énergie. Toutefois, pour libérer cette énergie il faut briser ces liaisons, car tant que ces molécules gardent leur structure originelle, l'énergie qu'elles contiennent restent potentielle c'est-à-dire non disponible.

Il existe deux voies possibles pour effectuer la rupture de ces liaisons chimiques et libérer l'énergie : la **respiration cellulaire** et la **fermentation**. Ces deux voies se distinguent par le fait que la première s'effectue en présence d'oxygène et la seconde en son absence. La respiration caractérise les plantes et les animaux qui sont des organismes pluricellulaires dotés d'organes qui leur permettent d'absorber l'oxygène, comme les stomates pour les plantes ou les poumons pour les animaux alors que la fermentation est propre aux monde des bactéries et protozoaires, organismes unicellulaires dépourvus de ces organes et qui vivent dans des milieux privés d'oxygène comme c'est le cas dans le rumen.

3.2. La respiration cellulaire

C'est la réaction qui permet de dégrader, en présence d'oxygène, des molécules organiques en molécules simples avec dégagement d'énergie. Quand nous respirons, nous aspirons de l'oxygène dans nos poumons qui est transporté par le sang jusqu'aux cellules de nos tissus. Grâce à cet oxygène, il va s'effectuer dans la cellule une série de réactions chimiques qui permettent de dégrader une molécule organique comme le glucose[47] par exemple pour en extraire l'énergie. On dit dans le langage courant, on brûle les sucres. Et comme l'action de brûler est une combustion, cela prend donc de l'oxygène. Cette réaction, schématisée comme ci-après, s'apparente donc à une combustion. Le glucose est «brûlé» en présence d'oxygène comme un carburant pour fournir de l'énergie.

Composé organique (glucose)	+	Oxygène	$\longrightarrow$	Gaz carbonique	+	Eau	+	**Energie**
$C_6H_{12}O_6$	+	O_2	$\longrightarrow$	CO_2	+	H_2O	+	**ATP (énergie)**

Il est d'usage, en chimie de présenter cette réaction sous une forme équilibrée c'est-à-dire avec le même nombre d'atomes au début et à la fin de la réaction. Ce qui donne l'expression suivante :

$$C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 36\,ADP + 36\,Pi \longrightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O + 36\,\textbf{ATP (énergie)}$$

Autrement dit, il faut six molécules d'oxygène pour dégrader une molécule de glucose. L'énergie dégagée par cette dégradation est « captée » par la molécule ADP[48] (adénosine diphosphate) qui l'utilise pour se lier à un atome de phosphore inorganique (Pi) et produire de l'ATP (note de bas de page N° 23). Il en résulte de cette réaction une production d'énergie ainsi que du gaz carbonique et de l'eau comme déchets de la dégradation du glucose. La cellule va rejeter à l'extérieur le gaz carbonique et l'eau qui seront transportés par le sang, selon le chemin inverse de l'oxygène, vers les poumons par où ils seront évacués et garde l'énergie sous forme d'ATP pour répondre à divers besoins (chaleur, mouvement, synthèse de nouvelles protéines …). C'est exactement ce que nous faisons quand nous respirons. Nous aspirons de l'oxygène qui sert à «brûler» des sucres pour «fabriquer» de l'énergie et nous rejetons du gaz carbonique et de la vapeur d'eau.

3.3. La fermentation des micro-organismes du rumen

Tout comme les plantes et les animaux, les micro-organismes vivant dans le rumen ont également besoin d'énergie pour vivre, se mouvoir et synthétiser leurs propres protéines. Ils ont donc besoin eux aussi de

---

partie apparente du processus, le reste se déroulant au niveau cellulaire. C'est pourquoi, on préfère l'expression «respiration cellulaire» à respiration tout court. Celle-ci englobe l'ensemble du processus comprenant ses manifestations externes (absorption de l'oxygène et rejet de gaz carbonique) et internes (réactions chimiques au niveau cellulaire).

[47] On a l'habitude d'utiliser le glucose comme modèle pour illustrer ce type de réaction. Mais d'autres molécules organiques peuvent également être utilisées.

[48] **ADP ou adénosine diphosphate** est une substance chimique qui utilise l'énergie libérée lors de diverses réactions biochimiques, pour former l'adénosine triphosphate (**ATP**).

dégrader des molécules organiques complexes en molécules simples pour produire de l'énergie sous forme d'ATP. Toutefois, comme le milieu ruminal est marqué par l'absence d'oxygène ces micro-organismes vont alors procéder par la voie de la **fermentation**. Celle-ci est une réaction spécifique aux organismes «unicellulaires» et se déroule également à l'intérieur de la cellule qui est dans ce cas, unique[49]. Ils utilisent, pour cela, les nutriments des fourrages que la vache ingère et qu'elle met à leur disposition pour produire de l'énergie selon un processus différent de celui de la respiration. Ici les «déchets» qui accompagnent la production d'énergie à partir de la dégradation de la molécule de glucose ne sont pas le gaz carbonique (CO_2) et l'eau (H_2O) comme dans le cas de la respiration mais des acides organiques appelés plus précisemment, **acides gras volatils**[50] communément désignés par l'abréviation **AGV**, ainsi que des gaz sous forme de gaz carbonique et de méthane (CH_4). En reprenant dans la forme, la réaction de la respiration, on peut alors écrire celle de la fermentation des micro-organismes du rumen comme suit :

Composé organique (glucose)	$\longrightarrow$	Acide gras volatil (AGV)	+	Gaz carbonique (CO_2)	+	Méthane (CH_4)	+	**Energie (ATP)**

A la fin du cycle de fermentation, les micro-organismes gardent l'énergie sous forme d'ATP pour répondre à leurs divers besoins (chaleur, mouvement…) et rejettent dans le milieu ruminal les AGV et les gaz.

4. Importance des micro-organismes du rumen dans la digestion chez la vache laitière

La présence des micro-organismes (bactéries et autres) dans le rumen est capitale pour la digestion et la bonne santé de la vache. C'est eux qui lui fournissent l'énergie (sous forme d'AGV) par le biais du processus de fermentation et une majeure partie des protéines.

Après avoir ingéré du fourrage et finit son repas, il se déclenche chez la vache un réflexe naturel de rumination. Ce dernier lui permet de régurgiter, c'est-à-dire faire remonter dans la bouche, le fourrage déjà avalé pour le mâcher à nouveau. Le but de cette seconde mastication est de réduire le fourrage ingéré en particules suffisamment fines pour que les micro-organismes du rumen puissent détruire les parois pecto-cellulosiques des cellules qui les composent et en libérer le contenu riche en nutriments. Il en résulte alors une bouillie dans le rumen composé de :

- sucres solubles et amidon,
- composés pariétaux glucidiques et non glucidiques,
- matières azotées protéiques et non protéiques,
- matières minérales
- et d'eau.

La majeure partie de ces composants va servir à alimenter la fermentation et l'action protéolytique[51] des micro-organismes.

4.1. Le devenir des glucides fournis par le fourrage ou comment les micro-organismes du rumen fournissent l'énergie à la vache

Les sucres solubles et l'amidon, sont très rapidement dégradés en sucre simple fermentescible (glucose) et fermentés par les microbes du rumen alors que les glucides des parois (cellulose, hémicellulose …), majoritaires dans la composition des fourrages, subissent une transformation plus lente avant d'être fermentés. Leur dégradation est réalisée par des microbes spécialisés qui possèdent une enzyme dite cellulolytique[52] appelée cellulase et que ne possède pas la vache. La fermentation microbienne finale est très importante puisque 60 à 90% des glucides y compris ceux des parois végétales (glucides pariétaux) sont

[49] Les bactéries et les protozoaires sont formés d'une seule cellule.

[50] Les **acides gras volatils** (**AGV**) sont de petites molécules d'acides gras. Leur appellation d'acides gras volatils tient au fait qu'ils sont liquides et volatils à température ambiante.

[51] Les **bactéries protéolytiques** sont des bactéries qui ont la capacité de détruire la structure des protéines du fourrage pour les dégrader en molécules simples d'acide aminé et d'ammoniac (NH_3) et fabriquer leurs propres protéines.

[52] Les **bactéries cellulolytiques** sont des bactéries qui ont la capacité de dégrader (cellulolyse) la cellulose. Elles sont présentes dans le système digestif des animaux herbivores et c'est grâce à elles que ces derniers peuvent consommer des aliments peu digestes comme l'herbe.

fermentés sauf si ces dernières sont lignifiées. Dans ce cas une partie de la cellulose, imprégnée de lignine est inaccessible aux enzymes cellulolytiques et échappe au processus de fermentation. Elle est alors rejetée dans les excréments. A la fin de la fermentation, les microbes du rumen captent l'énergie (sous forme d'ATP) produite par celle-ci pour couvrir leurs propres besoins d'entretien et de multiplication et rejettent dans le milieu ruminal les « déchets » composés par :

- les acides gras volatils (AGV) : essentiellement l'acide acétique, l'acide propionique et l'acide butyrique, dans des proportions variables selon la composition de la ration alimentaire de la vache,
- le gaz carbonique et le méthane.

Comme ces « déchets » (AGV) sont encore riches en énergie, la vache les reprend et les utilise pour ses propres besoins énergétiques. Ils constituent pour elle une source majeure d'énergie, puisqu'ils fournissent 70 à 80% de l'énergie totale dont elle a besoin. Ils traversent la paroi du rumen et diffusent dans le sang jusqu'aux cellules des tissus où ils servent comme principale source d'énergie. Les gaz sont quant à eux, éliminés soit directement par éructation (95%) soit par les poumons (5%).

4.2. La néoglucogenèse

Alors que les animaux monogastriques tirent leur énergie du glucose issu des aliments ingérés, la vache, animal ruminant poly-gastrique, utilise les acides gras volatils produits par les micro-organismes (fig. IV.3). C'est grâce à ce mécanisme que la vache valorise la cellulose qui compose les fourrages alors que celle-ci est indigestible chez les monogastriques. Toutefois, l'organisme de la vache laitière a tout comme celui des monogastriques besoin de glucose. Or, chez celle-ci le glucose apporté par l'alimentation ne représente que 1 à 4% seulement de l'énergie absorbée, puisque celui-ci est transformé par les micro-organismes du rumen en AGV. Par conséquent, la vache doit synthétiser son propre glucose.

C'est l'acide propionique (AGV) qui avec certains acides aminés est utilisé pour synthétiser ce glucose via le processus appelé « néoglucogenèse[53] ». Cette transformation de l'acide propionique qui est issu de la digestion microbienne des glucides pariétaux permet de couvrir 50 à 60% des besoins en glucose de la vache. On dit alors que l'acide propionique a une aptitude glucoformatrice et la source du glucose chez la vache est en grande partie endogène.

4.3. Le devenir des matières azotées fournies par le fourrage ou comment les micro-organismes du rumen fournissent des protéines à la vache

Contrairement aux animaux monogastriques chez qui la digestion des protéines alimentaires s'effectue par une voie enzymatique simple[54], chez les ruminants, elle suit deux voies. Une partie des protéines du fourrage passe, directement dans la caillette et l'intestin où elle est digérée par la voie enzymatique semblable à celle des monogastriques. La seconde partie est utilisée par les micro-organismes du rumen pour la synthèse de leurs propres protéines. Arrivés en fin de vie, ces derniers passent avec le transit digestif dans la caillette où ils subissent, avec les protéines du fourrage non dégradées dans le rumen, le processus classique de digestion. Les acides aminés en excès participent à la production d'énergie selon la voie de la néoglucogenèse ou seront dégradés sous forme d'urée. Celle-ci capte l'ammoniac en excès au niveau du foie, pour être transportée ensuite vers les reins *via* le sang où elle sera éliminée dans les urines et le lait. Elle peut aussi retourner au rumen *via* la salive (fig. IV.4).

On considère qu'il n'est pas nécessaire de fournir à la vache des protéines de haute qualité et inutilement chères, puisque de toute façon, une grande partie de celles-ci est transformée en azote minéral sous forme d'ammoniac (NH_3) avant d'être utilisée dans la synthèse des protéines microbiennes. C'est la raison, pour laquelle, on peut utiliser de l'urée alimentaire (toutefois à très faible dose soit un maximum de 40g/100kg de poids vif) pour complémenter une ration pauvre en matière azotée. Notez également (fig. IV.3) que la synthèse des protéines microbiennes à partir de l'ammoniac nécessite un apport[55] d'énergie qui doit être assuré

[53] La **néoglucogenèse** est la formation de glucose à partir de précurseurs non glucidiques (acides aminés, acide propionique...). Elle se produit essentiellement dans le foie.
[54] Les protéines sont en grande partie dégradées en acides aminés dans l'estomac et absorbés ensuite dans l'intestin grêle.
[55] D'une manière générale, en chimie ou en biochimie, la dégradation d'une grosse molécule en éléments chimiques plus petits produit de l'énergie et sa synthèse (ou «fabrication») consomme de l'énergie.

par une disponibilité suffisante de glucides fermentescibles dans la ration alimentaire, sinon l'insuffisance en énergie de la ration limitera la synthèse microbienne. La vache ne profitera pas alors pleinement des protéines du fourrage qui faute d'être adéquatement digérées, seront rejetées sous forme d'azote dans les urines. Il en découle pour l'éleveur des pertes économiques dues au gaspillage de la matière azotée de la ration et des pertes de rendement dans la production laitière. Il faut toujours rechercher un équilibre entre l'énergie et les protéines dans l'alimentation de la vache laitière.

En résumé, on peut dire que lorsqu'on alimente une vache, on nourrit d'abord les micro-organismes de son rumen qui, une fois repus, nourrissent à leur tour la vache. La compréhension de ce processus (avec celui de la digestion des glucides, évoqué ci-dessus) est importante car de ces derniers découlent les principes d'alimentation et de rationnement de la vache laitière que nous détaillerons dans les chapitres qui suivent.

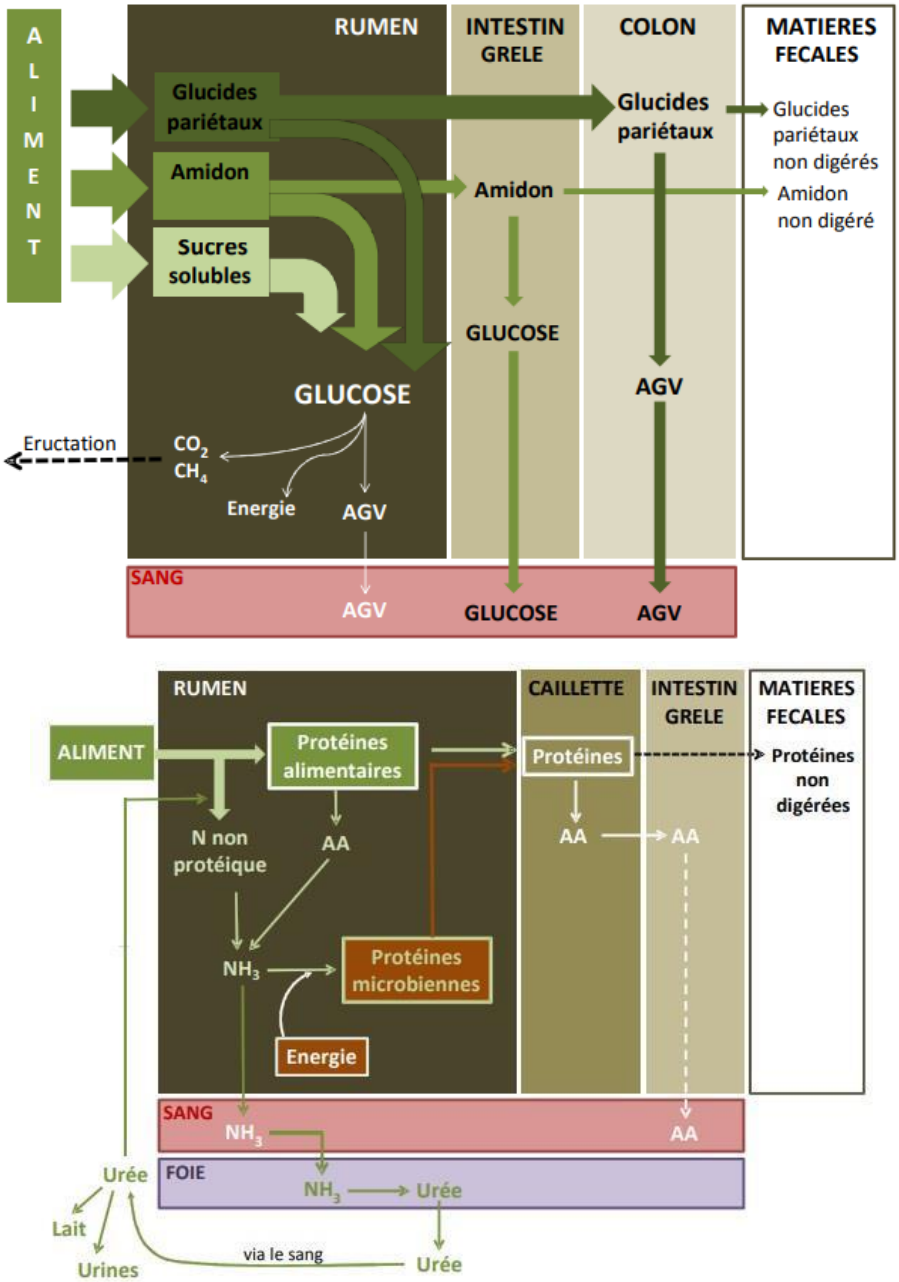


Figure IV.3 : Schéma de la digestion des glucides et de la matière azotée chez les ruminants (Source : C. CUVELIER et *al*, L'alimentation de la vache laitière. Université de Liège, Centre Wallon de Recherches Agronomiques)

5. Pathologie fréquente de la digestion chez la vache laitière en Algérie : L'ACIDOSE

Avec des rations alimentaires équilibrées entre fourrage et aliments concentrés, les acides gras volatils sont produits dans des proportions facilement absorbables. Evacués assez rapidement par les parois du rumen, ils ne s'accumulent pas et n'augmentent pas l'acidité du milieu ruminal. Celui-ci garde un pH autour de 6,5 à 7, variable au cours de la journée, mais en général proche de la neutralité pour un fonctionnement normal des micro-organismes. Mais si la quantité de concentré à base d'orge par exemple est exagérée dans la ration au détriment des fourrages comme c'est généralement le cas dans nos élevages en Algérie, l'amidon de l'orge se dégradant très rapidement dans le rumen (90 à 95%) par rapport aux glucides pariétaux (cellulose et hémicellulose), qui se dégradent lentement et partiellement (30 à 50% pour la même durée de temps), entraine une surproduction rapide d'AGV qui dépasse la vitesse d'évacuation. Les AGV produits par la dégradation de l'amidon sont alors en excès et s'accumulent rapidement dans le rumen. Ils entraînent la chute du pH et une acidité élevée du milieu ruminal. La population des bactéries cellulolytiques (qui vit à des pH proches de 7 et produit de l'acide acétique) baisse et sa fonction digestive du fourrage diminue. **L'ACIDOSE,** une pathologie de la digestion, apparait à ce stade dans une forme silencieuse qui perturbe la production laitière. Si les corrections ne sont pas apportées à l'alimentation, **L'ACIDOSE** s'aggrave. Les bactéries amilolytiques (qui dégradent l'amidon, produisent de l'acide propionique et fonctionnent à des niveaux de pH plus bas) prennent le dessus et continuent à produire des AGV, mais jusqu'à une certaine limite, car leur activité diminue au fur et à mesure que le milieu s'acidifie. À un niveau d'acidité élevé (aux environs de pH 5 et moins), l'acide lactique qui est un produit précurseur des AGV, n'est plus transformé et s'accumule dans le rumen (fig. IV.4). Ce produit, toxique pour la vache passe alors dans le sang et le foie et provoque des lésions dans son organisme. A ce stade la manifestation de **L'ACIDOSE** devient sévère et peut entrainer la mortalité de la vache.

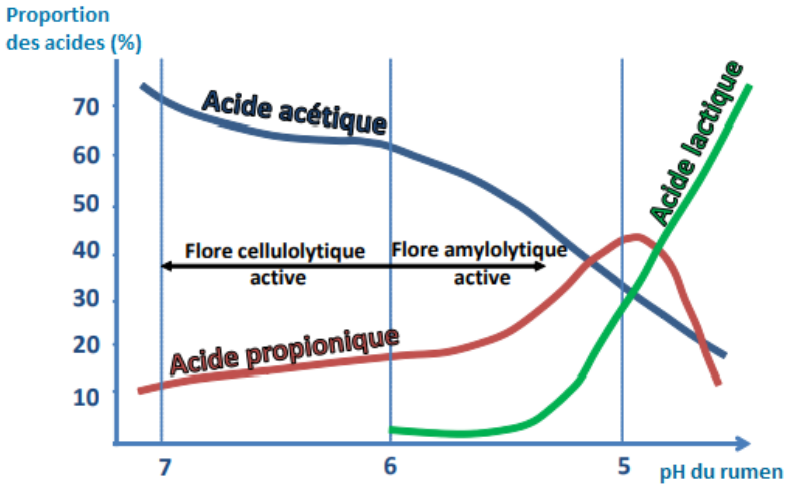


Figure IV.4 : Proportions des différents AGV et de l'acide lactique dans le rumen en fonction du pH
(Source[56] : R. JARRIGE. et *al,* Alimentation des bovins, ovins et caprins. INRA édition 1988)

En Algérie, dans la majorité des cas, les vaches sont nourries de manière assez aléatoire dans un contexte de pénurie chronique de fibres fourragères (en quantité et en qualité) et sans calcul de la ration alimentaire. Aussi pour compenser la pénurie ou la mauvaise qualité du foin, beaucoup d'éleveurs distribuent une alimentation exagérément riche en grains et aliments concentrés pour pouvoir maintenir une production laitière acceptable. Certaines enquêtes de terrain faites par des étudiants en agronomie rapportent que dans beaucoup d'élevages, les vaches reçoivent indépendamment de leur état physiologique et du niveau de production plus de 10 kg de concentré (orge, maïs et tourteau de soja) par vache et par jour pour une production moyenne de 12.8 litres de lait par jour.

[56] Cité dans L. DELTEIL et *al,* Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Tome 1. Educagri Editions. 2018.

6. La digestibilité

Les aliments ingérés ne sont pas digérés en totalité. Une partie seulement est digérée et le reste est évacué dans les fèces. Mais les quantités excrétées ne sont pas pareilles pour tous les produits. Certains, comme le sucre pur sont digérés entièrement et rien n'est rejeté ou presque et d'autres comme les légumes, riches en fibres le sont moins. On dit alors que le sucre est plus **digestible** que le légume ou que le sucre est le légume ont une **digestibilité** différente. C'est pareil pour les fourrages, certains sont plus ou moins digestibles que d'autres.

On définit la digestibilité (**d**) d'un fourrage par la proportion qui disparait dans le tube digestif quand celui-ci est ingéré par la vache et on l'exprime par la formule suivante.

$$\mathbf{d} = \frac{\mathbf{I} - \mathbf{F}}{\mathbf{I}} = \frac{\text{Quantité } \mathbf{I}\text{ngérée } - \text{Quantité excrétée dans les } \mathbf{F}\text{èces}}{\text{Quantité } \mathbf{I}\text{ngérée}}$$

Cette valeur désigne la digestibilité de la matière organique (MO) du fourrage et elle est exprimée par une valeur comprise entre 0 et 1 ou en pourcentage. On dira par exemple que la digestibilité de la MO organique du foin de vesce-avoine est :

dMO = 0,75 ou **dMO** = 75%

On mesure la digestibilité d'un fourrage directement sur l'animal ou en laboratoire. Il y a deux méthodes de mesures sur l'animal.

- Mesure *in vivo,* c'est-à-dire mesure qui s'effectue sur l'animal vivant. La vache placée dans une cage, reçoit en alimentation le fourrage dont on veut connaître la digestibilité. On pèse la quantité ingérée et celle des fèces rejetées et on calcule la digestibilité par la formule ci-dessus. On peut aussi analyser un échantillon des fèces rejetées et calculer séparément la digestibilité des différents composants de la matière organique (glucides pariétaux, azote, lipides … etc. …).
- Mesure *in saco,* c'est-à-dire mesure qui s'effectue dans des sacs. L'échantillon de fourrage pesé est mis dans un sachet poreux et introduit directement dans le rumen ou l'intestin de la vache. Après digestion de son contenu, le sachet est retiré et l'échantillon à nouveau pesé. On calcule la digestibilité par différence de poids avant et après. On peut également comme dans la méthode *in vivo* analyser l'échantillon avant et après et calculer la digestibilité des composants de la matière organique.

Au laboratoire la mesure de digestibilité est dite *in vitro* car elle s'effectue dans un contenant en verre.

- L'échantillon de fourrage pesé est mis à fermenter dans un tube en verre en présence de jus de rumen. On utilise aussi une enzyme pour mesurer la digestibilité de la cellulose qu'on note DCS pour digestibilité cellulase de la matière sèche.

En comparant un grand nombre de mesures de digestibilité de la matière organique et de la cellulose (celle-ci étant un composant des parois cellulaires du fourrage) on a noté un lien entre ces deux digestibilités et établi une loi générale disant : «***la digestibilité de la matière organique (dMO) des fourrages diminue quand la teneur en parois augmente***». Autrement dit, la digestibilité de la matière organique d'un fourrage dépend de celle de ses parois. Ce qui confirme les observations des chapitres précédents. Un fourrage coupé jeune et bien conservé est plus digestible et nutritif. Les teneurs en parois sont estimées par la mesure de la cellulose brute ou des fibres dites NDF et ADF, notions que nous examinerons plus en détail au chapitre XI relatif à l'analyse fourragère.

DEUXIEME PARTIE
FONDEMENTS THEORIQUES

L'ENERGIE ET LES PROTEINES
LA VALEUR D'ENCOMBREMENT DU FOURRAGE
LA CAPACITE D'INGESTION DE LA VACHE LAITIERE
LES MINERAUX

CHAPITRE V : Valeur nutritive d'un fourrage et besoins alimentaires de la vache laitière

1 Fonctions, propriétés et nouvelle formulation de la définition d'un fourrage

Nous avons vu dans le chapitre III qu'un fourrage est une plante composée d'eau, de matière minérale (MM) et de matière organique (MO). La matière organique contient des glucides, des lipides et des matières azotées. Pour les glucides nous avons distingué deux catégories : les sucres solubles qui se trouvent à l'intérieur de la cellule (glucides cytoplasmiques ou intracellulaires) et les sucres qui forment les parois de la cellule (glucides pariétaux). Pour l'azote, celui-ci se trouve également sous deux formes : matière azotée protéique et non protéique, mais non différencié au point de vue de sa localisation dans la cellule. Enfin pour ce qui en est des lipides, on les retrouve surtout comme réserve dans les graines, mais dans les fourrages, ils sont dans des proportions moindres (3 à 5% de la matière sèche) par rapport aux glucides et aux matières azotées.

Alors que l'eau et les minéraux sont absorbés directement dans le tube digestif de la vache sans subir de transformations les glucides et les matières azotées subissent une double digestion : par les micro-organismes dans le rumen et par les enzymes dans la caillette. Cette matière organique digérée fournit à la vache l'énergie et les protéines nécessaires pour se maintenir en vie et produire du lait.

Avec cette récapitulation on peut maintenant définir le fourrage comme un aliment qui a pour fonction de fournir à la vache laitière de l'énergie, des protéines et des éléments minéraux. Il doit en outre, présenter des propriétés de digestibilité et d'ingestibilité. Comme il existe différentes sortes de fourrages, les uns comme les graminées, apportant plus d'énergie, d'autres comme les légumineuses, apportant plus de protéines, il est alors important de se doter d'outils qui nous permettent de déterminer leur valeurs nutritives, établir des comparaisons et choisir entre plusieurs fourrages (quand cela est possible) pour répondre aux mieux aux besoins nutritifs du troupeau laitier. C'est bien sûr par l'analyse fourragère qu'on atteint cet objectif. Celle-ci permet de déterminer des composantes clefs facilement analysables comme la matière sèche, la matière organique, la matière azotée totale, les glucides pariétaux, la matière minérale… et on déduit par calcul mathématique la valeur nutritive du fourrage exprimée en énergie et en protéines. Quant à la valeur de la matière minérale elle n'a pas besoin d'être calculée, elle est déduite directement du résultat de l'analyse chimique. On passe alors de la formule générale d'un fourrage telle que présentée au chapitre III

Fourrage = Glucides + Matières azotées + Lipides + Matières minérales

à une formule simplifiée

FOURRAGE = ENERGIE + PROTEINES + MATIÈRES MINÉRALES

Par cette manière d'exprimer la valeur nutritive d'un fourrage, il devient alors facile d'établir des rations alimentaires pour les vaches laitières dont les besoins pour vivre, vêler et produire s'expriment aussi dans les mêmes termes : ENERGIE, PROTEINES ET MATIERES MINERALES.

La mesure de ces paramètres se faisant pour le fourrage et l'animal dans les mêmes unités – **UFL** (unités fourragères lait), **PDI** (protéines digestibles dans l'intestin) et **grammes** pour les matières minérales – permet alors de mettre facilement en adéquation les besoins et les apports pour équilibrer la ration alimentaire. Nous détaillerons plus loin la signification des UFL et des PDI.

2 Expression des besoins de la vache laitière

Pour vivre, donner naissance à un veau et produire du lait, une vache laitière a besoin, en plus de l'eau, des trois éléments essentiels qui définissent maintenant le fourrage : l'énergie, les protéines et les minéraux. Dans les conditions normales, ces nutriments, une fois digérés, apportent à la vache tous les constituants nécessaires au fonctionnement de son organisme. Pour chaque nutriment, on distingue trois types de besoins chez la vache laitière.

- **Les besoins d'entretien** : correspondent aux besoins d'un animal pour se maintenir en vie (sans variation de poids), assurer ses fonctions vitales (respiration, digestion, circulation sanguine…), permettre le

renouvellement de ses protéines et répondre à ses conditions de vie (déplacement, station debout, climat…). Ces besoins varient en fonction du poids de l'animal.

- **Les besoins de production** : correspondent aux dépenses énergétiques, protéiques et minérales de la vache pour produire du lait. Ces besoins varient en fonction de la quantité de lait produite et de sa teneur en matière grasse et en protéines.
- **Les besoins de gestation** : correspondent aux dépenses énergétiques, protéiques et minérales de l'animal pour produire un veau. Ces besoins varient selon la période de gestation et le poids présumé du veau à la naissance.

Dans le système français ces besoins (entretien, production et gestation) sont exprimés en **UFL** et en **PDI** (pour l'énergie et les protéines) et en **grammes** pour les minéraux. Le tableau de l'annexe A1 extrait des tables INRA France 2010, récapitule les niveaux des besoins de la vache selon son poids, sa production et son stade de gestation. Toutefois, il est possible que les valeurs de ces tables ne s'adaptent que partiellement à l'élevage laitier maghrébin qui est marqué par une typologie du cheptel et des conditions environnementales différentes de celles de la France où elles ont été mises au point. A ce propos, R. CHABACA et C. CHIBANI[57] notent que « la typologie des bovins exploités en Algérie (1,5 millions de têtes) est composée de 60% de races locales rustiques (mâle 400-450 kg ; femelles 300-350 kg), 20% d'animaux croisés de façon anarchique avec des races françaises et 20% de bovins dits modernes (pie noire, montbéliarde et Holstein) ». Mais faute de données propres aux conditions d'élevage maghrébines et algériennes, nous n'avons pas le choix que de prendre en considération ces dernières en prenant soin de les adapter avec précaution en fonction des observations concrètes faites sur les performances laitières et digestives des vaches suivies. Peut-être qu'un jour viendra où nous disposerons de nos propres référents.

[57] Chabaca R et C. Chibani 2010: Fourrages algériens: 2. Modèles de prédiction de l'ingestion. *Livestock Research for Rural Development. Volume 22, Article #190.* Retrieved November 24, 2020, from http://www.lrrd.org/lrrd22/10/chib22190.htm

CHAPITRE VI : Valeur énergétique. Fondements théoriques du calcul de la teneur en énergie

Comme évoqué au chapitre III, le fourrage est une plante dont le développement et la croissance obéissent à un processus déterminé par la photosynthèse. Par ce mécanisme, il fabrique des molécules dites organiques, pourvues d'énergie par transfert de l'énergie des photons et de celle résultant du remaniement des molécules d'eau et du gaz carbonique. Tant que le fourrage n'est pas consommé par la vache, celui-ci conserve cette énergie sous forme chimique. Celle-ci n'est libérée que sous l'effet des processus métaboliques qui brisent les liaisons entre atomes qui forment ces molécules (fermentation, digestion...). En se nourrissant, les vaches consomment ces molécules et transforment leur énergie chimique en d'autres formes d'énergie comme le mouvement et la chaleur par exemple. Ce processus de transformation de l'énergie d'un état à un autre se fait selon une loi universelle fondamentale connue en physique sous le nom de « première loi de la thermodynamique » ou encore « loi de la conservation de l'énergie ». Celle-ci énonce que « toute énergie qui disparaît sous une forme apparaît en quantité équivalente sous une autre ». En termes de nutrition, cela signifie que, si une vache ingère une certaine quantité d'énergie chimique contenue dans un fourrage, nous devons retrouver entièrement cette énergie en sortie sous une forme ou une autre. Elle peut être transformée en une autre forme d'énergie chimique fixée dans une production (viande, lait, gras) ou évacuée dans les déjections (les bouses sèches contiennent encore de l'énergie chimique qui se transforme en chaleur quand on les brûle) ou encore en énergie mécanique (mouvement) ou en chaleur (température du corps). Autrement dit « tout ce qui rentre doit sortir ». Partant de ce principe de conservation de l'énergie, on peut alors mesurer l'énergie d'un fourrage en transformant la totalité de son énergie chimique en énergie thermique en le brûlant. En mesurant simplement la quantité de chaleur produite par cette combustion dans un calorimètre (fig. VI.1) on mesure alors son énergie.

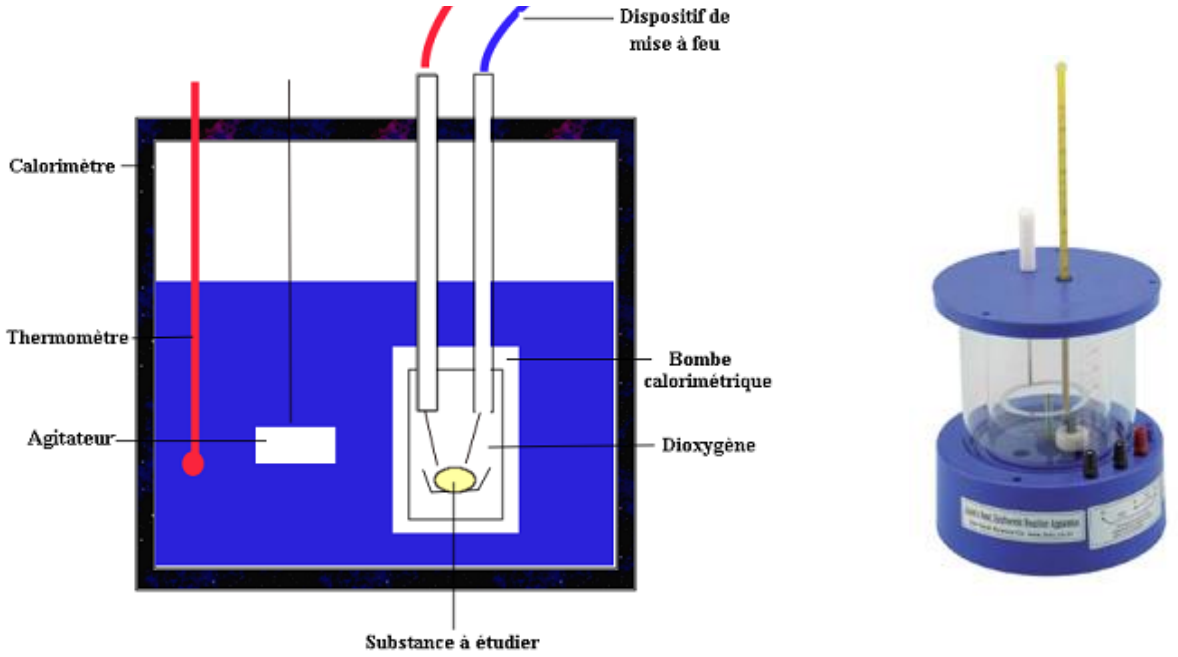


Figure VI.1 : Calorimètre. A gauche, représentation schématique. A droite, calorimètre électrique à double paroi transparente (Source : http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/c1025.aspx, http : //www.metrodis.fr/875.3.55.0.Calorimetre-transparent-800-ml)

L'énergie thermique dégagée par cette combustion est mesurée en calorie (cal) qui se définit comme l'énergie nécessaire pour augmenter la température de 1g d'eau de 1°C. Les multiples de la calorie sont la kilocalorie (1 Kcal = 1000 calories) et la mégacalorie (1 Mcal = 1000 Kcal = 1 000 000 cal). La calorie peut aussi être

exprimée en joules dans le système de mesure énergétique international. Dans ce cas on convertit les calories en joules ou en mégajoules en utilisant l'expression 1 calorie = 4,184 joules.

1. L'énergie d'un fourrage : fondements théoriques

1.1. L'énergie brute

L'énergie totale d'un aliment, mesurée dans un calorimètre est appelée énergie brute (**EB**). Comme on le voit dans le tableau ci-après, elle varie peu d'un aliment à un autre. Evaluée autour de 18 MJ/kg de MS, l'énergie brute de trois aliments différents : blé, foin et paille est sensiblement identique.

Aliment	Energie brute MJ/kg MS
Blé	18,5
Foin	18,5
Paille	18,2

Or par expérience, on sait que ces aliments satisfont de manières différentes les besoins des animaux, le blé étant plus nutritif que la paille. Pourtant, sur le plan de l'énergie brute, ils sont peu différents. Celle-ci ne peut donc donner une indication précise de leur valeur nutritive. Tout dépend de la constitution de l'aliment et de l'utilisation qu'en fait l'animal. Dans ce cas, le blé, riche en amidon, est rapidement digestible alors que la paille, riche en parois cellulosiques incrustées de lignine, est peu digestible. C'est la raison pour laquelle, la valeur énergétique d'un aliment exprimée en énergie brute renseigne peu sur sa valeur nutritive. Il nous faut alors une mesure énergétique plus précise qui s'obtient en mesurant ou en calculant d'autres états de cette énergie telle que l'énergie digestible (ED), l'énergie métabolisable (EM) et l'énergie nette (EN) qui au final est la seule retenue pour exprimer la valeur énergétique d'un fourrage.

1.2. L'énergie digestible

L'énergie brute (**EB**) n'est jamais valorisée complètement par l'animal et la partie non utilisée est évacuée dans les matières fécales. La partie restante est appelée énergie digestible (**ED**) et se calcule en soustrayant l'énergie des matières fécales (**EF**) de l'énergie brute,

$$ED = EB - EF$$

La digestion de l'énergie brute se fait avec une efficacité (digestibilité) plus ou moins élevée selon la qualité de l'aliment. Comme dans l'exemple précédent, le blé, riche en amidon, est plus digestible que la paille. On parle alors d'un taux de digestibilité de l'énergie brute ou plus simplement de **digestibilité de l'énergie** qu'on note **dE**, et on a :

$$dE = ED / EB \qquad (1)$$

ou encore

$$ED = EB \times dE \qquad (2)$$

Ce qui nous donne l'énergie digestible comme le produit de l'énergie brute et du taux de digestibilité.

1.3. L'énergie métabolisable

Une partie de l'énergie digestible (ED) est ensuite perdue via les urines (**EU**) et les gaz (**EG**) issus des fermentations digestives. L'énergie restante est appelée énergie métabolisable (**EM**). C'est la différence entre l'énergie digestible (ED) et l'énergie des urines (EU) ajoutée à celle des gaz (EG). Autrement dit :

$$EM = ED - (EU + EG)$$

On peut également définir l'énergie métabolisable comme étant l'efficacité d'utilisation de l'énergie digestible et on l'exprime par le produit de l'énergie digestible (ED) et son taux de transformation en énergie métabolisable (EM/ED).

$$\mathbf{EM = ED \times EM/ED} \qquad (3)$$

Mais contrairement au rapport (ED/EB) de l'équation (1) qui exprime la digestibilité de l'énergie brute (dE) pouvant être établie de manière expérimentale, le rapport (EM/ED) est calculé mathématiquement à partir des données de l'analyse chimique de l'aliment. Nous verrons dans les chapitres suivants comment le calculer.

1.4. L'énergie nette

Lorsque la vache mange, digère, respire, il se dégage d'elle une certaine quantité d'énergie sous forme de chaleur qu'on désigne par l'expression de « dépenses d'extra-chaleur » ou simplement « extra-chaleur ». En soustrayant cette dernière perte d'énergie de l'énergie métabolisable, on obtient l'**énergie nette** (**EN**) disponible pour l'entretien et la lactation. Seule cette énergie nette exprime la valeur énergétique d'un fourrage. Elle est représentée par l'équation ci-après

EN = EM – extra-chaleur

Pour la calculer, il faut mesurer les pertes d'extra-chaleur. Ces paramètres difficiles à évaluer sur l'animal, nécessitent des appareillages spéciaux et très coûteux que seuls de rares laboratoires dans le monde possèdent. Il existe différentes approches pour résoudre cette difficulté. Celle des pays nord-américains est différente par exemple de l'approche française développée par l'INRA-France, mais au final elles aboutissent à des résultats semblables. Dans ce qui suit, nous poursuivrons avec l'approche de l'INRA-France à laquelle les professionnels algériens et maghrébins sont habitués pour les raisons historiques déjà évoquées.

Pour contourner la difficulté d'évaluer l'énergie nette par l'expression EN = EM – extra-chaleur, on définit celle-ci comme étant l'efficacité d'utilisation de l'énergie métabolisable. Et de la même manière qu'on a défini l'énergie digestible comme étant l'efficacité d'utilisation de l'énergie brute par la formule ED = EB x dE, on pose pour l'énergie nette l'équation :

EN = EM x k

On symbolise cette « digestibilité de l'énergie métabolisable » par **k** pour la différencier de l'expression dE utilisée dans la formule précédente. Et on a alors :

k = EN/EM

On a constaté par ailleurs que les pertes d'extra-chaleur varient selon la fonction physiologique de l'animal (entretien et lactation). On attribue alors à k deux valeurs selon la fonction physiologique considérée qu'on note par convention $\mathbf{k_m}$ pour l'entretien (m pour maintenance en anglais) et $\mathbf{k_l}$ pour la lactation

Pour étudier les valeurs que peuvent prendre ces coefficients en fonction d'aliments à valeurs énergétiques différentes on a représenté dans la figure VI.2, les variations de k_m et k_l en fonction d'un rapport **q = EM/EB**, facilement mesurable et qui exprime la concentration en énergie métabolisable de différents aliments (paille, foin, ensilage de maïs et orge).

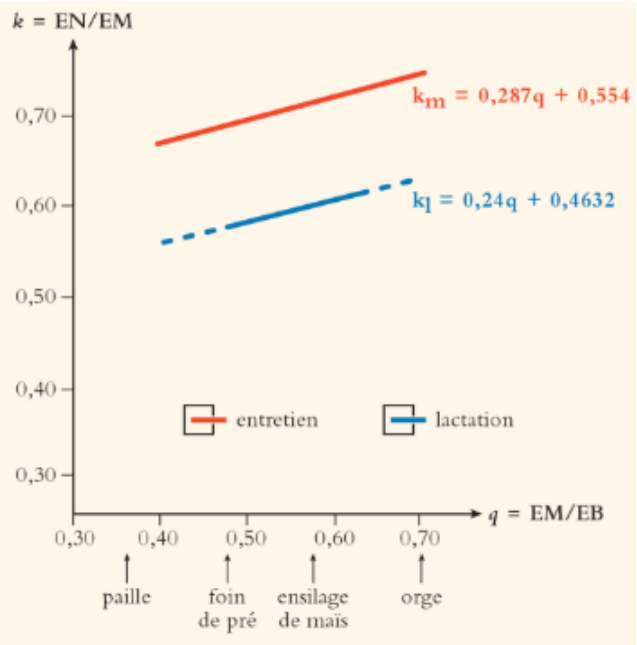


Figure VI.2 : Variation des rendements k_m et k_l en fonction de la concentration en énergie métabolisable (q = EM/EB) des aliments

(Adaptée de L. DELTEIL et *al* : Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Tome 1. Educagri Editions. 2018)

On constate sur cette figure que :

- k_m et k_l varient selon des droites en fonction de q. Elles sont donc des fonctions affines de q et leurs équations algébriques de forme générale y = ax + b, établies par les travaux de M. VERMOREL (1978, 1988) sont :

k_m = 0,287q + 0,554	**k_l = 0,240q + 0,4632**

- $k_m > k_l$ et ce, quel que soit l'aliment. Il y aurait donc théoriquement deux valeurs énergétiques nettes[58] pour chaque aliment tel que :

ENM (entretien) = EM x k_m (4)
ENL (lactation) = EM x k_l (5)

Ce qui n'est pas pratique pour établir l'énergie nette d'un fourrage.

Mais comme les coefficients directeurs (a = 0,287 pour k_m, et a = 0,240 pour k_l) des deux équations sont proches (0,287 ≈ 0,240), on considère que ces deux droites sont parallèles[59] (c'est une approximation) et elles présentent un rapport constant[60] tel que :

$$\boxed{\frac{\mathbf{km}}{\mathbf{kl}} \approx \mathbf{1,2}}$$

On peut alors écrire à partir des deux équations (4) et (5) précédentes :

$$\frac{\mathrm{ENL}}{\mathrm{kl}} = \frac{\mathrm{ENM}}{\mathrm{km}} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{ENL} = \mathrm{ENM} * \frac{\mathrm{kl}}{\mathrm{km}} = \frac{\mathrm{ENM}}{\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{kl}}} = \frac{\mathrm{ENM}}{1,2}$$

Et on déduit qu'un fourrage a la <u>même valeur relative</u> calculée en énergie nette pour l'entretien ou la lactation

$$\mathrm{ENL} = \frac{\mathrm{ENM}}{1,2} \qquad \text{et} \qquad \mathrm{ENM} = \mathrm{ENL} * 1,2$$

Compte tenu de ce rapport constant (k_m/k_l = 1,2), et pour éviter d'attribuer deux valeurs d'énergie à un même fourrage, on exprime son énergie nette en énergie nette de lactation (**ENL**) évaluée pour une vache laitière <u>dont on a couvert la dépense d'entretien</u>.

$$\boxed{\mathbf{ENL = EM \times k_l \quad avec\ k_l = 0,24q + 0,4632}}$$

On peut développer encore dans cette expression le terme EM en considérant que :

EM = ED x EM/ED (équation 3) et ED = EB x dE (équation 2)

Ce qui nous donne la formule finale de l'énergie nette d'un fourrage

$$\boxed{\mathbf{ENL = EB} \times \mathbf{dE} \times \mathbf{EM/ED} \times \mathbf{k_l}}$$

EB est déterminée par calorimétrie (ou calculée), le facteur dE et le rapport EM/ED sont calculés mathématiquement à partir des résultats de l'analyse chimique du fourrage et enfin le coefficient de rendement k_l est établi à partir de q = EM/EB par l'équation k_l = 0,24q + 0,4632. Ces notions seront explicitées et approfondies dans les parties III et IV consacrées aux analyses fourragères et le calcul de la valeur alimentaire des fourrages.

Exemple : Soit à calculer l'énergie nette de 1 kg de matière sèche d'avoine avec les données suivantes :

EB = 4656 kcal dE = 0,65 EM/ED = 0,826 k_l = 0,598

ENL = EB x dE x EM/ED x k_l = 4656 x 0,65 x 0,826 x 0,598 = **1495 kcal**

[58] ENM (= énergie nette d'entretien), ENL (= énergie nette de lactation)
[59] En algèbre, on considère que deux droites sont parallèles si leurs équations ont le même coefficient directeur.
[60] Le rapport entre les coefficients directeurs de k_m et k_l est égal à 0,287 / 0,240 = 1,196 ≈ **1,2**

2. Expression pratique de la valeur énergétique d'un fourrage

Il existe de par le monde, différents systèmes d'expression de l'énergie nette d'un fourrage pour la vache laitière. Au Canada par exemple on la mesure en Mcal/kg de MS et dans le système INRA-France, on utilise l'unité fourragère lait (**UFL**) et on l'exprime en UFL/kg de MS.

Ce système a été choisi par commodité pour s'affranchir de l'utilisation des calories et des joules, unités utilisées en physique et un peu abstraites quand on les applique au calcul des rations alimentaires pour animaux. Dans ce système, on exprime l'énergie nette d'un fourrage utilisée par la vache laitière par rapport à l'énergie nette de lactation d'un kilogramme d'orge récolté au stade grain mûr présentant 85% de matière sèche. C'est ce qu'on appelle l'orge de référence. Avec les données suivantes qui le caractérisent :

$$EB = 3850 \text{ kcal} \qquad dE = 0{,}837 \qquad EM/ED = 0{,}839 \qquad k_l = 0{,}632$$

On peut calculer son énergie nette de la même manière que celle appliquée à l'avoine dans l'exemple précédent.

$$\mathbf{ENL_{orge}} = EB \times dE \times EM/ED \times k_l = 3850 \times 0{,}837 \times 0{,}839 \times 0{,}632 = \mathbf{1708\ kcal}$$

On a arrondi ce résultat à 1700 kcal et on a adopté cette valeur comme équivalente à 1 UFL de manière à pouvoir exprimer l'énergie nette d'un fourrage ou tout autre aliment destinés à une vache laitière dans une unité de mesure (UFL) permettant de comparer facilement leur valeur énergétique. On peut donc en déduire deux expressions tel que :

1 UFL = 1700 kcal d'ENL

$$\textbf{Valeur énergétique en UFL d'un fourrage X} = \frac{\textbf{Energie nette en kcal du fourrage X}}{\textbf{1700 kcal}}$$

Pour exprimer la valeur énergétique de l'avoine de l'exemple précédent en UFL, il suffit de diviser son énergie nette exprimée en kcal par 1700 kcal tel que :

$$\text{Valeur énergétique de l'avoine} = \frac{1495 \text{ kcal}}{1700 \text{ kcal}} = \mathbf{0{,}88\ UFL/kg\ MS}$$

3. Principe de calcul des besoins en énergie de la vache laitière

Les besoins en énergie de la vache laitière et la valeur énergétique du fourrage sont exprimés dans la même unité : l'unité fourragère lait (UFL). Ceci permet de comparer les besoins de la vache par rapport à l'offre fourragère et déterminer s'il y lieu d'équilibrer la ration alimentaire par le rajout d'un aliment concentré. Nous illustrons par les exemples ci-après comment sont calculées les valeurs qui figurent à l'annexe A1.

3.1. Les besoins en énergie pour l'entretien d'une vache laitière

Le calcul des besoins en énergie pour l'entretien d'une vache laitière s'appuie sur une donnée de recherche qui établit la dépense d'entretien de la vache laitière à 84 kcal/kg de poids métabolique[61] noté $PV^{0,75}$ (PV étant le poids vif de l'animal). Comme vu précédemment on peut exprimer cette dépense d'entretien (ENM) en énergie nette de lactation (ENL) par l'équation (4) :

$$ENL_{entretien} = \frac{ENM}{1{,}2} = \frac{84}{1{,}2} = 70 \text{ kcal/kg } PV^{0,75}$$

et calculer le besoin d'entretien d'une vache qui pèse 600 kg par exemple, en énergie nette de lactation :

$$70 \times 600^{0,75} = 70 \times 121{,}2 = 8464 \text{ kcal d'EN de lactation par jour}$$

Pour exprimer ce besoin en UFL, il suffit de diviser ce résultat par 1700 kcal, soit :

[61] Poids métabolique : Poids vif élevé à la puissance 0,75 (exprimé par $PV^{0,75}$). Cette expression traduit le fait que la dépense énergétique d'entretien varie avec la surface corporelle plutôt qu'avec le poids et permet de comparer les besoins des animaux de poids différents. (Source : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Tables INRA 2007, mise à jour 2010, éditions Quae, 2010).

$$\text{Besoin d'entretien en UFL/j pour une vache de 600 kg} = \frac{8464 \text{ kcal}}{1700 \text{ kcal}} = \mathbf{5\ UFL/j}$$

3.2. Les besoins en énergie pour la production de 1 kg de lait standard

On définit un lait standard comme un lait contenant 4% de matière grasse et 3,1% de protéines ou autrement dit 40 g de matière grasse et 31 g de protéines par kg de lait produit (avec un kg de lait équivalent à 0,969 litre. Un kg de lait étant un peu plus lourd qu'un litre d'eau).

Si on brûle 1 kg de lait dans un calorimètre, il s'en dégagera 740 kcal. Partant du principe de la loi de la conservation de l'énergie qui énonce que « toute énergie qui rentre doit sortir » cela veut dire qu'un kg de lait standard contient 740 kcal d'énergie nette de lactation et entraîne un besoin en énergie égal chez la vache pour le produire. Pour exprimer ce besoin en UFL, il suffit de le diviser par 1700 kcal soit :

$$\text{Besoin en énergie pour produire 1 kg de lait standard} = \frac{740 \text{ kcal}}{1700 \text{ kcal}} = \mathbf{0,44\ UFL/j}$$

Si notre vache produit 15 litres de lait par jour c'est-à-dire 15,48 kg (exprimé en kilo en divisant 15 litres par 0,969) elle aura besoin de :

Besoin en UFL par jour pour une production de 15 litres de lait : 0,44 UFL x 15,48 = **6,8 UFL**

Pour un lait présentant des teneurs en matière grasse et protéines différentes de celles du lait standard, il faut se reporter à l'annexe A1.

3.3. Les besoins en énergie pour la gestation

Comme pour l'énergie d'entretien on exprime également les besoins (ou dépenses) en énergie nette de gestation en énergie nette de lactation (ENL). Mais l'équation de l'énergie fixée dans le veau est plus complexe. Dans la pratique, le calcul de ces besoins sont effectués à partir du 6ème mois de gestation et font intervenir le poids du veau à la naissance. Les valeurs de ces besoins sont fournies à l'annexe A1.

Exemple : par lecture directe dans le tableau de l'annexe A1, on note que le besoin en énergie de gestation d'une vache au 7ème mois de gestation est de 1,1 UFL pour un veau dont le poids prévu à la naissance est de 45 kg.

3.4. Besoins totaux en énergie d'une vache laitière exprimés en UFL

En cumulant les trois types de besoins calculés ou notés dans le tableau de l'annexe A1, on établit alors les besoins en énergie exprimés en UFL d'une vache laitière. Dans le cas des exemples précédents, il s'agissait d'établir les besoins en énergie d'une vache pesant 600 kg, produisant 15 litres de lait par jour et au 7ème mois de gestation. Le calcul cumulé est présenté dans le tableau ci-après.

	Besoins journaliers en **UFL**
Besoin d'entretien	05,0
Besoin de production de lait	6,4
Besoin de gestation	1,1
Besoins totaux	**12,5**

En pratique, vous n'avez pas à faire ces calculs, puisque tous les résultats figurent dans le tableau de l'annexe A1. Celui-ci couvre tous les cas de figure. Il y a juste à utiliser les valeurs qui y figurent pour déterminer les besoins recherchés.

CHAPITRE VII : Valeur protéinique. Fondements théoriques du calcul de la teneur en protéines

1. La matière azotée

En plus de l'énergie, la vache a besoin aussi de protéines pour produire du lait, construire et renouveler ses tissus. Dans l'annexe A1, les besoins en protéines (pour l'entretien, la production et la gestation) sont exprimés dans la 3ème colonne du tableau, en grammes de **PDI** (**protéines digestibles dans l'intestin)**. Or, il n'existe pas dans la composition du fourrage (chapitre III) de composants désignés par cette expression et aucune analyse chimique ou autre n'est en mesure de déterminer directement la teneur en PDI d'un fourrage. De plus ce que nous appelons protéines pour la vache ne se présente pas toujours sous forme de protéines proprement dites dans le fourrage. Celles-ci, obligatoirement formées d'une molécule contenant de l'azote sont comprises dans un ensemble chimique plus vaste, désigné par l'expression «**matière azotée**». Celle-ci comprend aussi bien des matières azotées protéiques (acides aminés libres, peptides et protéines) que des matières azotées non protéiques pouvant être organiques (amides, amines, bases azotées …) ou minérales (nitrites, nitrates, ammonium). Quel est alors le lien entre les matières azotées du fourrage et les **PDI** ?

1.1. La matière azotée totale (MAT)

L'ensemble de la matière azotée d'un fourrage forme ce qu'on appelle la **matière azotée totale (MAT)**. On dit aussi protéines brutes, appellation qui figure parfois sur les étiquettes de certains aliments de bétail. On dose chimiquement la teneur en matière azotée totale (MAT) d'un fourrage par la méthode dite de Kjeldahl[62] selon le principe expliqué en note de bas de page. On admet que l'azote dosé par cette méthode représente 16% de la matière azotée totale **(MAT)** car celui-ci représente en moyenne 16% du poids des acides aminés. Ce n'est pas une estimation précise car les formes nitriques (nitrates, nitrites) échappent à cette analyse, mais vu leur faible proportion dans la MAT, on considère cette approximation acceptable. On établit alors la matière azotée totale d'un fourrage en multipliant la teneur en azote (N) déterminée par la méthode Kjeldahl par 100/16. Comme 100/16 = 6,25, on représente par convention, la teneur en matière azotée totale **(MAT)** d'un fourrage par l'expression :

$$\boxed{\mathbf{MAT = N \times 6{,}25}}$$

Cette formule est une approximation suffisante de la teneur en matière azotée totale du fourrage mais pas «opérationnelle» pour déterminer sa teneur en PDI (protéines digestibles dans l'intestin).

1.2. La matière azotée digestible (MAD)

La matière azotée digestible (**MAD**), correspond théoriquement à la différence entre les matières azotées totales (**MAT**) consommées et celles non digérées qu'on retrouve dans les fèces et se calcule comme suit :

$$\mathbf{MAD = N \times 6{,}25 \times CUD}$$

CUD (**coefficient d'utilisation digestive ou digestibilité)** représente le pourcentage de l'aliment ingéré par l'animal qu'on ne retrouve pas sous forme fécale.

1.3. Des MAD au PDI

Cette notion de MAD pour évaluer la teneur utile en azote d'un fourrage était basée, comme pour l'énergie, sur l'hypothèse que le fourrage fournit à lui seul les protéines dont la vache a besoin. En réalité et comme nous l'avons vu au chapitre IV consacré à la digestion, les protéines qui arrivent dans l'intestin grêle de la vache (là où elles sont absorbées) ont une double origine. L'une est alimentaire (provenant du fourrage) et la seconde est microbienne (provenant des bactéries qui se sont développées dans le rumen de la vache en captant une partie des protéines fourragères). Aussi, pour calculer la valeur azotée d'un fourrage, on ne peut plus continuer à se baser sur l'hypothèse de la digestion en l'état de ses matières azotées. On doit tenir compte de

[62] La **méthode de Kjeldahl** est une technique de détermination chimique du taux d'azote dans un échantillon. Tout l'azote organique est minéralisé sous forme d'ammoniac (NH_3) pour être facilement dosé.

la partie qui arrive dans l'intestin directement sous forme de protéines fourragères (dites alimentaires) et de celle qui disparait dans le rumen au profit des micro-organismes et qui arrive ensuite dans l'intestin sous forme microbienne.

Partant de ce constat, l'unité **MAD** jusqu'alors utilisée dans l'estimation de la valeur azotée fourragère a été abandonnée depuis 1978, date à laquelle, de nouvelles tables des valeurs alimentaires des fourrages ont été publiées par l'INRA-France et dans lesquelles une nouvelle unité de mesure a vu le jour, intitulée **PDI** pour **protéines digestibles dans l'intestin.** Celle-ci prend séparément en compte les protéines d'origine alimentaire (**PDIA**) et les protéines d'origine microbienne (**PDIM**) qui sont formées par le captage d'une partie de la MAT du fourrage. On verra plus bas, comment ces valeurs sont calculées.

2. Les protéines digestibles dans l'intestin (PDI)

Une fois ingérée par la vache, la matière azotée totale (**MAT**) d'un fourrage va se scinder en deux parties. La première formée uniquement de protéines, traverse le rumen et aboutit telle quelle dans la caillette où elle est digérée et dans l'intestin grêle où elle est absorbée. Elle constitue ce que l'on appelle les **protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire** (**PDIA**). La seconde partie séjourne un certain temps dans le rumen où elle subit, sous l'action des micro-organismes, un double remaniement désigné par les termes de **protéolyse** et de **protéosynthèse.** Le produit résultant de ce remaniement est utilisé par ces derniers pour construire leurs propres protéines. Cette partie de la MAT du fourrage est donc transformée en **matière azotée microbienne (MAm)** et c'est sous cette forme qu'elle est digérée par la vache. On la désigne par l'acronyme **PDIM (protéines digestibles dans l'intestin d'origine microbienne**). On considère que la somme des **PDIA** et des **PDIM** constituent les **PDI** (protéines digestibles dans l'intestin) avec :

$$\boxed{\mathbf{PDI = PDIA + PDIM}}$$

C'est l'unité par laquelle on évalue aujourd'hui, les besoins azotés de la vache laitière exprimés en grammes (Annexe A1) et, avec quelques nuances près (que nous verrons ci-après), la valeur azotée d'un fourrage qu'on exprime également en gramme par kilogramme de matière sèche (MS).

La transformation de la matière azotée fourragère (**MAT**) en matière azotée microbienne (**MAm**), se fait selon deux processus : le premier (**protéolyse**) décompose les molécules de la matière azotée fourragère et le second (**protéosynthèse**) les réorganise pour construire la matière azotée microbienne (**MAm**).

2.1. La protéolyse

Une fois arrivée dans le rumen, la partie de la matière azotée du fourrage qui sera destinée à la fabrication de la matière azotée microbienne (**MAm**) subit une attaque des micro-organismes. On dit que ces derniers lui font subir une **protéolyse**[63]. Ce sont en premier lieu, les constituants non protidiques (urée, amides …) et les constituants protidiques simples (acides aminées, peptides …) qui sont attaqués plus ou moins rapidement puis viennent ensuite les grosses protéines. Les produits issus de cette dégradation sont transformés en composés azotés simples sous forme de molécules d'ammoniac (NH_3) par ce qu'on appelle la phase d'ammoniogenèse[64] qui veut dire « naissance ou production d'ammoniac ».

2.2. La protéosynthèse

La protéosynthèse est le processus par lequel les microbes du rumen fabriquent (on dit aussi synthétisent) leurs propres protéines à partir de l'ammoniac (NH_3) rendu disponible par le couple protéolyse/ ammoniogenèse. Cette protéosynthèse suppose, en plus de la « ressource azote » fournie par l'ammoniac, la disponibilité d'une **source d'énergie** (note de bas de page N°55). Celle-ci est fournie par ce qu'on appelle la **matière organique fermentescible** (**MOF**) du fourrage (glucides intracellulaires et pariétaux principalement, lipides et acides aminées, secondairement).

Dans les conditions normales, on considère, qu'environ 60% des acides aminés absorbés dans l'intestin de la vache proviennent des bactéries qui ont crû dans le rumen grâce à l'ammoniac et 40% proviennent des pro-

[63] **Protéolyse** : dégradation des protéines par des enzymes protéolytiques excrétées par les micro-organismes du rumen.
[64] **Ammoniogenèse** : catabolisme des protéines aboutissant à la formation d'ammoniac par suite de la désamination des acides aminés.

téines alimentaires qui ont résisté à la protéolyse. Ce qui confirme ce qui a été mentionné au chapitre IV, lorsqu'on fournit de la matière azotée à une vache, on nourrit surtout les micro-organismes de son tube digestif qui à leur tour, vont nourrir l'animal.

3. Principes de calcul de la valeur PDI d'un fourrage

Compte tenu des processus de transformation de la matière azotée totale en **PDI** ci-dessus exposés, le calcul de la valeur **PDI** d'un fourrage nécessite la détermination préalable de quatre facteurs.

- La teneur en matière azotée totale (**MAT**).
- La dégradabilité théorique (**DT**) qui permet d'estimer les matières azotées dégradées dans le rumen.
- La teneur en matière organique fermentescible (**MOF**) qui permet d'évaluer l'énergie disponible pour la protéosynthèse.
- La digestibilité réelle (**dr**) des acides aminés qui permet d'estimer les parts finales des protéines d'origine alimentaire (**PDIA**) et celles d'origine microbienne (**PDIM**).

3.1. La dégradabilité théorique (DT) des matières azotées

La dégradabilité théorique (DT) des matières azotées peut être mesurée par ce qu'on appelle des « tests de dégradabilité ». Ces derniers permettent d'estimer directement la part des matières azotées transformables par protéolyse pour produire les **MAm** (matières azotées microbiennes) et indirectement, par soustraction, celle des **PDIA** (protéines d'origine alimentaire). Le résultat de ces tests est désigné par l'expression «**dégradabilité théorique»** notée **DT** et il est exprimé en pourcentage**.**

On évalue la **DT** par la méthode dite des sachets de nylon. Elle consiste à introduire dans le rumen de la vache des sachets de nylon perméables contenant un échantillon du fourrage à analyser. Ces sachets sont retirés ensuite à intervalles croissants (au bout de deux heures, quatre heures, huit heures …etc.… jusqu'à 48 heures) pour doser la matière azotée (ou ce qui en reste) de l'échantillon de fourrage qu'ils contiennent. On constate à chaque fois une diminution de cette dernière. Au-delà de 48 heures, la quantité de **MA** résiduelle des sachets se stabilise et on ne note plus de diminution. On déduit que la partie de **MA** disparue, correspond à celle ayant subi la protéolyse. En exprimant en pourcentage la partie de **MA** disparue par rapport à la quantité de **MA** initiale on calcule la **dégradabilité théorique DT** du fourrage tel que :

$$\mathbf{DT}\ \% = \frac{\mathbf{MA}\ \text{dégradée dans le rumen}}{\mathbf{MAT}}\ \text{x}100$$

En appliquant ce pourcentage à la matière azotée totale (**MAT**), on déduit la matière azotée dégradée dans le rumen tel que :

Matière azotée dégradée dans le rumen = **MAT x DT**

Et par soustraction, la matière azotée non dégradée en sachets (**MANDS**) qui s'écrit :

MANDS = MAT – (MAT x DT) = MAT (1- DT)

Toutefois, durant l'expérience des sachets en nylon dans le rumen, on a constaté que des particules azotées sortent des sachets et quittent le rumen sans subir de protéolyse. Ce taux de sortie est estimé à 6% par heure. Pour en tenir compte dans l'évaluation de la **matière azotée réellement non dégradable dans le rumen** (**MAND**) qui fournira les **PDIA** (protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire), on majore celle-ci par un coefficient établi à 1,11 tel que :

MAND = 1,11 x MAT (1 - DT)

Et on exprime la matière azotée dégradable dans le rumen, qui fournira les matières azotées microbiennes (**MAm**) par :

Matière azotée dégradable (qui fournit les Mam) = MAT – MAND

Cette méthode des sachets en nylon (évoquée ici à titre pédagogique) est longue et coûteuse et seuls quelques centres de recherche spécialisés sont capables de la mettre en œuvre, aussi des méthodes plus simples dites

enzymatiques ont été développées permettant des mesures directes en laboratoire sur les fourrages sans passer par l'utilisation d'un animal.

3.2. La teneur en matière organique fermentescible (MOF)

La protéosynthèse nécessite (comme vu précédemment), en plus de la «ressource azote», fournie par l'ammoniac, la disponibilité d'une source d'énergie. Celle-ci est fournie par la **matière organique fermentescible (MOF)**. On évalue la teneur en **MOF** d'un fourrage en soustrayant de sa **matière organique digestible** (**MOD**) l'énergie qui n'est pas utilisée directement par les micro-organismes pour la protéosynthèse tels que les produits de fermentation des ensilages[65] (**PF**), les matières grasses (**MG**) et les matières azotées non dégradées en sachets (MANDS).

$$\mathbf{MOF = MOD - (PF + MG + MANDS)}$$

Le rendement de la protéosynthèse et donc la production de la matière azotée microbienne (**MAm**) dépend de la présence simultanée des deux éléments (**l'azote sous forme de NH_3 <u>et</u> l'énergie sous forme de MOF)**. Il est, selon les principes de la loi du minimum, fonction de la quantité de l'élément dont la concentration dans le milieu ruminal est la plus faible. Si l'ammoniac est le facteur limitant, la production de la **MAm** sera fonction de cet élément et si inversement la **MOF** est le facteur limitant, elle sera proportionnelle à cet élément.

On admet que le rendement de la protéolyse est de 100%, celui de la protéosynthèse à 90% et que les micro-organismes synthétisent environ 145 g de **MAm** par kilogramme de **MOF**. Dans ce cas :

- si l'ammoniac est le facteur limitant, la quantité de matière azotée microbienne (**MAm_N**) permise par l'azote est :

$$\mathbf{MAm_N = 0{,}90 \times MA\ dégradable}$$

- si la **MOF** est le facteur limitant, la quantité de matière azotée microbienne (**MAm_E**) permise par l'énergie est :

$$\mathbf{MAm_E = 0{,}145 \times MOF}$$

MAm_N et **MAm_E** sont exprimées en grammes.

3.3. La digestibilité réelle (dr) des acides aminés d'origine alimentaire

Il a été démontré que :

- les matières azotées alimentaires provenant des **MAND** (matières azotées non dégradables dans le rumen) sont constituées à 100 % de protéines vraies et utiles et leur digestibilité réelle (**dr**) varie entre 60 et 95%. Le reste qui n'est pas digéré, est désigné par l'acronyme **PANDI** (protéines alimentaires non digérées dans l'intestin) dont nous verrons l'intérêt dans les chapitres consacrés au calcul de la valeur alimentaire d'un fourrage, donc :

$$\mathbf{PDIA = MAND \times dr = 1{,}11 \times MAT\ (1 - DT) \times dr}$$

- les matières azotées microbiennes sont constituées de seulement 80% de protéines vraies et utiles et leur digestibilité réelle (**dr**) est également de 80%, donc :

$$\mathbf{PDIM = 0{,}80 \times 0{,}80 \times MAm = 0{,}64\ MAm}$$

4. Application au calcul de la valeur PDI d'un fourrage

Des différentes expressions évoquées dans les paragraphes précédents, on peut maintenant déduire facilement :

$$\mathbf{PDIA = 1{,}11 \times MAT\ (1 - DT) \times dr} \quad \text{Et} \quad \mathbf{PDIM = 0{,}64\ MAm}$$

[65] Le fourrage ensilé fermente et produit des éléments qui normalement ne font pas partie de sa composition en tant que fourrage vert. Il s'agit entre autres des acides gras volatils et de l'acide lactique formés lors du processus de fermentation.

Comme **PDIM** est fonction de la variable **MAm** dans l'expression (**PDIM = 0,64 MAm**) et que celle-ci peut prendre deux valeurs $\mathbf{MAm_N}$ ou $\mathbf{MAm_E}$ selon que nous soyons en situation limitante soit par la matière azotée soit par l'énergie tel que :

$$\mathbf{MAm_N = 0{,}90 \times MA\ dégradable} \quad \text{ou} \quad \mathbf{MAm_E = 0{,}145 \times MOF}$$

Il est facile de déduire que **PDIM** peut prendre aussi deux valeurs que l'on notera

- $\mathbf{PDIM_N}$: protéines d'origine microbienne permises par l'azote quand celui-ci est facteur limitant
- $\mathbf{PDIM_E}$: protéines d'origine microbienne permises par l'énergie quand celle-ci est facteur limitant

Le calcul de ces deux valeurs est développé dans le tableau ci-après :

Tableau VII.1: Calcul des $PDIM_N$ et des $PDIM_E$

PDIM = 0,64 MAm	
Si facteur limitant = AZOTE	**Si facteur limitant = ENERGIE**
$\mathbf{MAm_N = 0{,}90 \times MA\ dégradable}$	$\mathbf{MAm_E = 0{,}145 \times MOF}$
$MAm_N = 0{,}90 \times (MAT - MAND)$ $= 0{,}90 \times [(MAT - 1{,}11 \times MAT\ (1 - DT)]$ $= 0{,}90 \times MAT\ [1 - 1{,}11\ (1 - DT)]$ $= 0{,}90 \times MAT\ [1 - (1{,}11 - 1{,}11\ DT)]$ $= 0{,}90 \times MAT\ (1 - 1{,}11 + 1{,}11\ DT)$ $= 0{,}90 \times MAT\ (1{,}11\ DT - 0{,}11)$ $= MAT\ (0{,}999\ DT - 0{,}099)$ $\approx MAT\ (DT - 0{,}10)$	$MAm_E = 0{,}145 \times MOF$
$\mathbf{MAm_N = MAT\ (DT - 0{,}10)}$	$\mathbf{MAm_E = 0{,}145 \times MOF}$
$PDIM_N = 0{,}64 \times MAm_N$ $= 0{,}64 \times MAT\ (DT - 0{,}10)$	$PDIM_E = 0{,}64 \times MAm_E$ $= 0{,}64 \times 0{,}145 \times MOF$ $= 0{,}093 \times MOF$
$\mathbf{PDIM_N = 0{,}64 \times MAT\ (DT - 0{,}10)}$	$\mathbf{PDIM_E = 0{,}093 \times MOF}$

Comme la valeur azotée d'un fourrage se mesure en PDI tel que PDI = PDIA + PDIM et que la variable PDIM prend deux valeurs $PDIM_N$ et $PDIM_E$, le terme PDI prendra également deux valeurs et permet d'attribuer à un fourrage deux valeurs azotées, tel que :

$$\mathbf{PDIN = PDIA + PDIM_N = PDIA + [0{,}64 \times MAT\ (DT - 0{,}10)]}$$
$$\mathbf{PDIE = PDIA + PDIM_E = PDIA + (0{,}093 \times MOF)}$$

Ces expressions expriment les deux valeurs azotées (**PDIN** et **PDIE**) d'un fourrage tandis que les besoins de la vache eux restent exprimés en PDI.

Il y a pour un fourrage deux valeurs azotées appelées PDIN et PDIE

Les **PDIN** sont la somme des **PDIA** et des protéines d'origine microbienne permises par l'azote et les **PDIE**, la somme des **PDIA** et des protéines d'origine microbienne permises par l'énergie. Ces deux valeurs ne s'additionnent pas. Quand on établit une ration alimentaire pour la vache laitière, on veille seulement à établir autant que possible une égalité entre **PDIN** et **PDIE** tel que **PDIN = PDIE**. C'est ce que nous verrons dans le chapitre consacré au calcul de la ration alimentaire des vaches laitières.

- Si PDIN > PDIE, l'excès de PDIN est éliminé par la vache sous forme d'urée dans les urines et se traduit par un gaspillage d'azote.

- Si PDIN < PDIE, on peut le tolérer jusqu'à une certaine limite. Et dans ce cas, il faut être conscient que l'excès d'énergie va aller dans l'accumulation des graisses au lieu de servir à la production du lait, but évidemment que nous ne visons pas.

Exemple

Soit à calculer les valeurs **PDIN** et **PDIE** d'un ensilage de maïs qui présente les caractéristiques suivantes

MO (matière organique)	942 g	**dMO** (digestibilité de la MO)	0,71
MAT (matière azotée totale)	84 g	**DT** (dégradabilité théorique)	0,72
MG (matière grasse)	30 g	**dr** (digestibilité réelle)	0,70
PF (produits de fermentation)	74 g		

Nous savons que :

$$\mathbf{PDIN = PDIA + PDIM_N}$$
$$\mathbf{PDIE = PDIA + PDIM_E}$$

Donc nous devons calculer PDIA, $PDIM_N$ et $PDIM_E$ (exprimés toutes en g/kg de MS)

PDIA = MAND x dr
= 1,11 x MAT (1 - DT) x dr
= 1,11 x 84 (1 – 0,72) x 0,70
= **18,3 g/kg de MS**

$PDIM_N$ = 0,64 x MAT (DT – 0,10)
= 0,64 x 84 (0,72 – 0,10)
= **33,3 g/kg de MS**

$PDIM_E$ = 0,093 x MOF

Dans ce cas MOF n'est pas fournie dans les données, donc il faut la calculer, sachant que :
MOF = MOD – (PF + MG + MANDS)

Nous avons deux inconnues : MOD et MANDS
MOD = MO x dMO = 942 x 0,71 = 668,8 g/kg de MS
MANDS = MAT (1- DT) = 84 (1- 0,72) = 23,5 g/kg de MS

Connaissant maintenant les valeurs de MOD et MANDS, nous pouvons calculer MOF
MOF = MOD – (PF + MG + MANDS)
= 668,8 – (74 + 30 + 23,5)
= 668,8 –127,5 = 541,3 g/kg de MS
On peut donc calculer maintenant $PDIM_E$

$PDIM_E$ = 0,093 x MOF
= 0,093 x 541,3
= **50,3 g/kg de MS**

Comme PDIA = 18,3 g/kg de MS, il devient alors facile de déduire les valeurs PDIN et PDIE du fourrage :

PDIN = PDIA + $PDIM_N$ = **18,3 + 33,3 = 52 g/kg de MS**
PDIE = PDIA + $PDIM_E$ **= 18,3 + 50,3 = 69 g/kg de MS**

CHAPITRE VIII : Valeur d'encombrement d'un fourrage et d'un aliment concentré

1. Valeur d'encombrement d'un fourrage (VEF)

1.1. L'ingestibilité d'un fourrage

L'ingestibilité d'un fourrage est la quantité de « **matière sèche**[66] **volontairement ingérée** (**MSVI**) » par une vache en 24 heures quand ce fourrage lui est distribué seul et à volonté. Cette **MSVI**, n'est pas constante et varie selon le type de fourrage servi. On a observé par exemple qu'une vache laitière standard[67] consomme en 24 heures :

- 17 kg de matière sèche d'herbe jeune de prairie fraichement coupée
- et seulement 10,6 kg de matière sèche de paille de blé

quand l'un ou l'autre de ces aliments lui est présenté seul et séparément.

La taille du rumen étant toujours la même (Il s'agit de la même vache), qu'est-ce-qui explique alors cette différence ? On sait intuitivement qu'une herbe jeune fraichement coupée a une valeur nutritive et une digestibilité plus élevée qu'une paille de blé. L'herbe, riche en sucre rapidement fermentescible et peu fibreuse, met moins de temps à être digérée et évacuée du rumen que la paille, fibreuse et lignifiée. La digestion de la paille étant plus lente, le rumen reste alors longtemps **encombré.** La vache ne ressent pas la faim et se contente des 10 kg de paille sur 24 heures en attendant que le rumen se vide avant de se remettre à manger. Avec l'herbe par contre, le transit est rapide et dès que le rumen se vide, la vache se remet à manger jusqu'à arriver à 17 kg dans le même laps de temps. On dit alors que l'herbe est moins **encombrante** que la paille, par conséquent plus **ingestible**. Il y aurait donc pour chaque fourrage une **valeur d'encombrement fourragère (VEF)** qui lui est propre et qui limite ou favorise **l'ingestibilité** de sa matière sèche.

1.2. Le système des unités d'encombrement (UE)

Nous déduisons de l'exemple précédent que plus un fourrage est ingestible (cas de l'herbe jeune) moins il est encombrant et inversement, moins il est ingestible (cas de la paille) plus il est encombrant. Ce qui nous permet d'écrire que l'encombrement d'un fourrage est égal à l'inverse de son ingestibilité.

$$\textbf{Encombrement} = \frac{\textbf{1}}{\textbf{Ingestibilité}}$$

Si on utilise ce rapport pour caractériser l'encombrement de l'herbe et de la paille de l'exemple précédent, on écrira

$$\text{Encombrement}_{\text{herbe}} = 1/17 \text{ kg MS} \quad = \mathbf{0{,}06 \ / \ kg\ MS}$$

$$\text{Encombrement}_{\text{paille}} = 1/10{,}6 \text{ kg MS} = \mathbf{0{,}09 \ / \ kg\ MS}$$

Le chiffre 0,09 > 0,06 indique seulement que la valeur de l'encombrement de la paille est plus grande que celle de l'herbe mais ne renseigne pas si celle-ci est peu ou trop encombrante parce que ces chiffres ne s'inscrivent pas dans une échelle de comparaison commune à tous les fourrages.

Par contre, si nous utilisons l'herbe comme référence et nous adoptons par convention son encombrement égale à **1 UE** (**UE = unité d'encombrement**), nous pouvons exprimer, dans cette unité, l'encombrement de la

---

[66] La quantité de fourrage ingérée par une vache ou calculée dans une ration alimentaire est toujours exprimée en kilogramme de **matière sèche (MS)** et non en kilogramme de poids frais. Les fourrages présentent des teneurs variables en humidité ou autrement dit en matière sèche (**MS**) selon leur état de conservation. Un fourrage vert par exemple présente un taux de MS autour de 30% alors que celui d'un foin est de 85%. Cela veut dire que 1 kg de fourrage vert contient 300 grammes de MS seulement et 700 à 900 grammes d'eau. Le foin étant plus sec, 1 kg de ce dernier contiendrait 850 grammes de MS. Lorsqu'on alimente une vache ce n'est pas l'eau qui nous intéresse, celle-ci n'ayant pas de valeur alimentaire mais c'est la matière sèche du fourrage qui contient tous les éléments nutritifs. Il nous faut alors utiliser une unité de mesure commune à tous les fourrages qui nous libère du poids variable de l'eau et qui nous permet de comparer les fourrages entre eux. Si on exprime la quantité de fourrage ingéré par une vache en poids frais (PF) on dira par exemple qu'elle a mangé :

10 kg de fourrage vert + 10 kg de foin = **20 kg PF**

Si par contre on exprime cette quantité en matière sèche, notre vache aura mangé seulement :

(10 kg de fourrage vert x 30%) + (10 kg de foin x 85%) = **11,5 kg MS**

[67] **Vache laitière standard** : vache laitière adulte de 600 kg en pleine lactation produisant 25 kg de lait à 4% de matière grasse.

paille par rapport à celle de l'herbe sachant que 1 UE = 0,06 /kg MS

$$\text{Encombrement}_{\text{paille}} = 0{,}09/0{,}06 = \mathbf{1{,}5\ UE}$$

et

$$\text{Encombrement}_{\text{herbe}} = 0{,}06/0{,}06 = \mathbf{1\ UE}$$

La **valeur d'encombrement** devient plus compréhensible car elle est exprimée dans une unité de mesure simple (**UE**) et dans un système référencé par un fourrage étalon. On dira par exemple que :

- la valeur d'encombrement de la paille est de **1,5 UE**;
- qu'elle est élevée car dans le système considéré, la référence pour une bonne valeur d'encombrement est **1 UE**. Par conséquent son ingestibilité est faible.

1.3. La valeur d'encombrement d'un fourrage : définition

A partir des calculs précédents, il est maintenant simple de déduire que la **valeur d'encombrement d'un fourrage** (**VEF**), exprimée dans une unité d'encombrement spécifique (**UE**), est obtenue par le rapport entre l'encombrement du fourrage considéré (qu'on désignera par **X**) et celle du fourrage de référence.

$$\text{VEFx} = \frac{\text{Encombrement du fourrage X}}{\text{Encombrement du fourrage de référence}}$$

$$\text{VEFx} = \frac{\dfrac{1}{\text{Ingestibilité du fourrage X}}}{\dfrac{1}{\text{Ingestibilité du fourrage de référence}}}$$

$$\boxed{\mathbf{VEFx} = \frac{\textbf{Ingestibilité du fourrage de référence}}{\textbf{Ingestibilité du fourrage X}}}$$

D'où la définition de la valeur d'encombrement d'un fourrage (VEF)

La valeur d'encombrement d'un fourrage (VEF) est égale à la quantité consommée (ou l'ingestibilité) d'un « fourrage de référence » divisée par la quantité consommée (ou l'ingestibilité) du fourrage considéré.

1.4. Fourrage de référence et détermination de son ingestibilité chez la vache laitière

Le fourrage de référence retenu dans le système INRA France est représenté par une herbe jeune, au stade pâture, présentant 15% de matière azotée, 25% de cellulose brute[68] et une dMO[69] à 77%. On a établi par expérience qu'une vache laitière standard pesant 600 kg ingère 17 kg de MS de fourrage de référence par jour. Rapportée à son poids métabolique, cette ingestibilité, exprimée en grammes de MS par kilogramme de poids métabolique est désignée **QIL** (quantité ingérée par la vache laitière) avec :

$$\text{QIL} = \frac{17}{\text{PV}^{0{,}75}} = \frac{17}{600^{0{,}75}} + \frac{17}{121{,}2} = 0{,}140\ \text{kg} = \mathbf{140\ g\ MS/kg\ PV^{0{,}75}/j}$$

1.5. Unité de mesure de la valeur d'encombrement d'un fourrage

L'unité de mesure de la valeur d'encombrement d'un fourrage (**VEF**) est, pour la vache laitière **l'UEL (unité d'encombrement lait)**. Une **UEL** correspond à l'encombrement de 1 kg de matière sèche du fourrage de référence. Comme la vache laitière standard ingère 17 kg de MS du fourrage de référence et que l'encombrement de 1 kg de MS de ce fourrage de référence est fixé arbitrairement à 1 UEL, elle ingère donc 17 UEL/17 kg MS soit 1 UEL/kg MS.

[68] Cellulose mesurée par la méthode de Weende (chapitre XI)
[69] Digestibilité de la matière organique

Exemple : Valeur d'encombrement de la paille de blé

$$VEF_{paille} = \frac{\text{Ingestibilité fourrage référence}}{\text{Ingestibilité paille de blé}} = \frac{17 \text{ kg MS}}{10{,}6 \text{ kg MS}} = \frac{17 \text{ UEL}}{10{,}6 \text{ kg MS}} = \mathbf{1{,}6 \text{ UEL/kg MS}}$$

1.6. Valeur d'encombrement d'un fourrage en fonction de son ingestibilité exprimée en g MS/kg $PV^{0,75}$

Comme l'ingestibilité du fourrage de référence pour la vache laitière standard est :

$$\mathbf{QIL_{fourrage\ de\ référence} = 140 \text{ g MS/kg } PV^{0,75}/j}$$

on peut calculer la valeur d'encombrement d'un fourrage quelconque pour une vache laitière par la formule :

$$VEF_X = \frac{\text{Ingestibilité fourrage référence}}{\text{Ingestibilité fourrage X}} = \frac{QIL_{\text{fourrage référence}}}{\text{QIL fourrage X}} = \frac{\mathbf{140}}{\mathbf{QIL_X}}$$

Les mesures directes sur l'animal pour déterminer l'ingestibilité d'un fourrage (**QIL_X**) sont longues et coûteuses. Dans la pratique on a développé des méthodes plus simples qui permettent de déterminer par équation (on dit aussi de prédire) **QIL** d'un fourrage quelconque à partir d'éléments dosables de ce dernier par analyse au laboratoire.

Exemple : l'équation de calcul de QIL pour un foin[70] de prairie de montagne est :

QIL = 82,4 + 0,491 dMO + 0,114 MAT

Soit à calculer la VEF d'un foin présentant une dMO de 61,2% et une teneur en MAT de 75 g/kg de MS

QIL = 82,4 + 0,491 dMO + 0,114 MAT
QIL = 82,4 + (0,491 x 61,2) + (0,114 x 75)
QIL = **121** g MS/kg $PV^{0,75}$

la VEF du foin est alors :

VEF = 140 / QIL = 140/121 = 1,15 UEL/kg MS

2. Valeur d'encombrement d'un aliment concentré (VEC)

Quand on ajoute un aliment concentré à une ration alimentaire, la vache réduit sa consommation de fourrage. On considère donc que le concentré a aussi une valeur d'encombrement qu'on note **VEC**. Par exemple, on a constaté qu'une vache qui habituellement consomme 17 kg de MS de fourrage par jour sans concentré, ne consomme plus que 15,2 kg de ce même fourrage si on lui rajoute 4,5 kg de concentré. L'apport du concentré réduit donc la consommation du fourrage de 1,8 kg. On dit qu'il y a **substitution** du fourrage par le concentré. La part du fourrage non consommé par kg de concentré consommé s'appelle **taux de substitution global** noté **Sg** et s'évalue en divisant la quantité de fourrage non consommée par celle du concentré consommée :

$$\mathbf{Sg} = \frac{\text{Quantité de fourrage non consommée (kg MS)}}{\text{Quantité de concentré consommée (kg MS)}} = \frac{17 - 15{,}2}{4{,}5} = \frac{1{,}8}{4{,}5} = \mathbf{0{,}4}$$

Cela veut dire que pour chaque kilogramme de concentré consommé, la vache ingère 400 g MS de moins de fourrage. Ce qui est facile à vérifier puisque 4,6 kg x 0,4 = 1,8 kg de fourrage non ingéré et 17 kg – 1,8 kg = 15,2 kg qui correspond exactement à la consommation de la vache.

On exprime la valeur d'encombrement d'un concentré par la formule :

VEC = Sg x VEF

[70] Alimentation des bovins, ovins et caprins. Tables INRA 2007, mise à jour 2010, éditions Quae, 2010. Tableau 8.14, page 181.

VEF est une valeur constante (c'est la valeur d'encombrement du fourrage associé au concentré) mais Sg varie selon la teneur en énergie du fourrage associé, des besoins énergétiques de la vache selon qu'elle soit primipare[71] ou multipare[72] et de sa production laitière.

On détermine la valeur **Sg** qui varie entre 0 et 1 avec **l'annexe A2.**

Exemple : Une ration alimentaire, calculée pour une vache laitière multipare avec une production de lait potentielle de 30 kg est composée par un foin, présentant une VEF de 1,05 UEL et une valeur énergétique de 0,95 UFL, et d'un concentré X. Calculer la VEC du concentré X.

En utilisant **l'annexe A2**, on détermine le taux de substitution global (Sg). Pour une valeur d'encombrement du fourrage de 1,05 UEL, au croisement de la ligne 0,95 (valeur UFL) et de la colonne 30 (multipare) la valeur de Sg est égale à 0,42.

On calcule la VEC du concentré X par la formule : VEC = Sg x VEF = 0,42 X 1,05 = **0,44 UEL/kg MS**

Si maintenant, on associe le même concentré X à un fourrage présentant une VEF de 1,10 UEL et une valeur énergétique de 0,75 UFL pour une vache primipare avec une production de lait potentielle de 20 kg,

la VEC du concentré X devient : VEC = Sg x VEF = 0,35 X 1,10 = **0,38 UEL/kg MS**

Ce qui confirme la variabilité de la valeur d'encombrement d'un aliment concentré (**VEC**) en fonction des valeurs UEL et UFL du fourrage qui lui est associé et des caractéristiques de la vache.

(Ci-après, extrait du tableau de **l'annexe A2**)

Fourrage		**Production de lait potentielle (kg/j)**									
		Primipare					**Multipare**				
Valeur UEL	**Valeur UFL**	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**	**20**	**25**	**30**	**35**	**40**
1,05	**1,00**	0,65	0,50	0,40	0,35	0,31	0,66	0,55	0,46	0,40	0,36
	0,95	0,59	0,45	0,38	0,33	0,31	0,61	0,50	**0,42**	0,38	0,34
	0,90	0,53	0,42	0,36	0,32	0,30	0,55	0,46	0,40	0,36	0,33
	0,85	0,49	0,40	0,35	0,32	0,30	0,51	0,43	0,38	0,35	0,33
	0,80	0,45	0,38	0,34	0,32	0,30	0,47	0,41	0,37	0,34	0,32
	0,75	0,43	0,37	0,33	0,32	0,30	0,44	0,39	0,36	0,34	0,32
1,10	**0,95**	0,54	0,42	0,35	0,31	0,29	0,56	0,46	0,39	0,35	0,32
	0,90	0,49	0,39	0,34	0,31	0,29	0,51	0,43	0,37	0,34	0,32
	0,85	0,45	0,37	0,33	0,31	0,29	0,47	0,40	0,36	0,33	0,31
	0,80	0,43	0,36	0,32	0,31	0,29	0,44	0,39	0,35	0,33	0,31
	0,75	0,40	**0,35**	0,32	0,31	0,29	0,42	0,37	0,34	0,32	0,31
	0,70	0,39	0,35	0,32	0,31	0,30	0,40	0,37	0,34	0,32	0,31

[71] Vache qui vêle pour la première fois.
[72] Vache qui a vêlé plusieurs fois.

CHAPITRE IX : Capacité d'ingestion d'une vache laitière

1. Définition

De même que les fourrages sont caractérisés par une **valeur d'encombrement (VEF)**, la vache laitière est caractérisée par une **capacité d'ingestion (CI)**.

La capacité d'ingestion d'une vache laitière notée CI est la quantité de matière sèche du fourrage de référence volontairement ingérée sur une période de 24 heures.

Comme 1 kg de MS du fourrage de référence est égal à **1 UEL**, on exprime la capacité d'ingestion (**CI)** d'une vache laitière également en unité d'encombrement lait (**UEL)**. L'expression de la **valeur d'encombrement d'un fourrage** et la **capacité d'ingestion** de l'animal dans la même unité (**UEL**) permet d'ajuster la ration alimentaire selon le fourrage utilisé.

2. Calcul de la capacité d'ingestion (CI) d'une vache laitière

La capacité d'ingestion (**CI**) d'une vache laitière est constante pour un poids, un état physiologique et une production donnée mais elle varie si ces facteurs varient. Pour la calculer on tient compte de six facteurs qui sont regroupés en deux catégories dans le tableau figurant à l'annexe A3.

La première catégorie est constituée de **facteurs** dits **à effets principaux**. Ces derniers s'additionnent et sont constitués par :

- le poids de la vache en kg de poids vif,
- le potentiel de production de lait (en kg/j),
- la note d'état qui indique l'état d'obésité ou de maigreur de la vache (accumulation ou non de tissus de réserve).

La seconde catégorie est constituée par **les facteurs** dits **de correctifs multiplicatifs**. Ils se multiplient à la somme des facteurs à effets principaux et sont constitués par :

- le stade de lactation en nombre de semaines,
- le stade de gestation (en nombre de semaines),
- l'âge de la vache en mois.

Pour calculer **la capacité d'ingestion (CI)**, Il faut faire la somme des facteurs à effets principaux et la multiplier par le produit des correctifs multiplicatifs.

Exemple : En utilisant l'annexe A3, calculer la CI d'une vache de 600 kg qui produit 25 kg de lait et présente une note d'état de 2. Elle est multipare, en 8ème semaine de lactation, non gestante et âgée de 44 mois.

$$CI = (13{,}90 + 3{,}75 + 1{,}50) \times (0{,}92 \times 1 \times 0{,}97) = 17 \text{ UEL/j}$$

3. Prévision de la matière sèche volontairement ingérée (MSVI) par une vache laitière

La connaissance de la capacité d'ingestion d'une vache laitière et de la VEF d'un fourrage, exprimées toutes deux en UEL permet de prévoir la masse sèche d'un fourrage qui sera volontairement ingérée (**MSVI**) par cette dernière On l'exprime en kg de MS et on la calcule par l'équation :

$$\mathbf{MSVI} = \frac{\mathbf{CI}}{\mathbf{VEF}}$$

Exemple : En reprenant le cas de notre vache précédente avec une capacité d'ingestion CI = 17 UEL/j, quelle sera la MSVI d'un fourrage présentant une VEF = 1,2 UEL, qu'elle consommera quotidiennement.

On établit sa consommation de MSVI en **kg de MS** en divisant sa CI par la VEF du fourrage :

$$\text{MSVI} = \frac{\text{CI}}{\text{VEF fourrage}} = \frac{17\ \text{UEL/j}}{1{,}2\ \text{UEL/kg MS}} = \mathbf{14\ kg\ MS/j}$$

Mangera-t-elle la même quantité de matière sèche si on lui offre de la paille de blé dont la VEF est de 1,6 UEL/kg de MS à la place du fourrage de référence ?

$$\text{MSVI} = \frac{\text{CI}}{\text{VEF paille de blé}} = \frac{17\ \text{UEL}}{1{,}6\ \text{UEL/ kg MS}} = \mathbf{10{,}6\ kg\ MS}$$

Non, car la capacité d'ingestion (CI) d'une vache est constante, par contre la masse sèche volontairement ingérée (**MSVI**) du fourrage varie en fonction de la VEF de celui-ci. Plus la VEF est basse, plus la vache consommera du fourrage et plus elle produira du lait et inversement, plus elle est élevée, moins elle consommera de fourrage et en conséquence moins elle produira de lait.

En supposant que la valeur énergétique du fourrage est 0,97 UFL/kg MS, la consommation de 14 kg MS de ce fourrage apporte **13,6 UFL** (14 x 0,97 UFL). Par contre la consommation de 10,6 kg MS de paille de blé qui a une valeur énergétique de 0,42 UFL/kg MS ne couvre que **4,5 UFL** (10,6 x 0,42 UFL). Il y a un déficit de **9,1 UFL**. Le besoin en énergie de la vache ne peut donc pas être comblé avec la paille, sa CI étant invariable. Il faut alors compenser par un aliment concentré. Si dans cette situation, on force la vache à produire du lait par une consommation exagérée de concentré comme c'est souvent le cas dans nos élevages, le coût de production de ce dernier devient prohibitif et la santé des vaches menacées par **l'acidose.**

La connaissance de la capacité d'ingestion (**CI**) est à la base de tout programme d'alimentation. C'est le premier élément à connaitre pour définir une ration alimentaire. Et quand on vise une bonne production laitière, il est nécessaire de veiller à fournir à la vache un fourrage avec une VEF aussi basse que possible, et une valeur nutritive aussi élevée que possible.

4. Notion de densité énergétique d'un fourrage

La densité énergétique est une notion qui dérive des sciences physiques. Elle mesure la teneur en énergie d'une substance rapportée à une unité de volume. Elle permet de comparer à volume égal, la teneur énergétique d'une substance par rapport à une autre. On dira par exemple, dans le domaine des carburants que la densité énergétique du propane (ou GPL pour celles ou ceux habitués à ce type de carburant) est égale à 26 Mégajoules/litre et celle l'essence à 34. Ce dernier serait donc 1,3 fois plus énergétique que le propane.

Dans le domaine des fourrages, si nous assimilons l'UEL (unité d'encombrement lait) à une sorte d'unité de volume puisque elle exprime un **encombrement,** on peut exprimer la **densité énergétique d'un fourrage** notée (**DEF**) par le rapport entre son énergie, mesurée en **UFL** (**UFL_f** pour énergie du fourrage) et sa valeur d'encombrement, mesurée en **UEL** tel que :

$$\mathbf{DEF = UFL_f/VEF}$$

Comme la capacité d'ingestion (**CI**) d'une vache laitière est constante mais que la densité énergétique d'un fourrage (**DEF**) varie, on doit toujours s'assurer, lors de l'établissement d'une ration alimentaire, que celle-ci couvre les besoins en énergie de la vache pour atteindre les objectifs de production. Pour cela, on calcule la **densité énergétique minimale de la ration** notée (**DERm**) qui est le ratio des besoins énergétiques totaux de la vache sur sa capacité d'ingestion (CI) tel que :

$$\mathbf{DERm = UFL_v/CI}$$

Avec :

- UFL_v = besoin énergétique de la vache établi à partir du tableau de l'annexe A1
- CI = capacité d'ingestion de la vache déterminée à partir du tableau de l'annexe A3

Ce rapport caractérise l'objectif que la ration distribuée doit atteindre en termes de concentration énergétique. Ces notions de densité énergétique du fourrage (**DEF**) et de densité énergétique minimale de la ration (**DERm**) sont importantes dans la démarche pour le calcul de la ration alimentaire de la vache laitière que nous aborderons de manière approfondie au chapitre consacré au calcul de la ration.

Exemple : pour nourrir une vache présentant un besoin de 16,7 UFL et une CI de 17 UEL, on dispose d'un fourrage présentant une teneur en énergie de 0,97 UFL et une VEF égale à 1,2 UEL. On veut savoir, en comparant la densité énergétique du fourrage (DEF) avec la densité énergétique minimale (DERm) que doit avoir la ration, si l'utilisation du fourrage seul peut couvrir les besoins en énergie de la vache.

Deux situations peuvent se présenter :

$$DEF \geq DERm \quad \text{ou} \quad DEF < DERm$$

- Si DEF ≥ DERm, le fourrage peut à lui seul suffire à combler les besoins énergétiques de l'animal
- Si DEF < DERm, le fourrage même distribué à volonté ne peut à lui seul couvrir les besoins énergétiques de l'animal

$$DEF = UFL_f/VEF = 0{,}97/1{,}2 = \mathbf{0{,}80}$$
$$DERm = UFL_v/CI = 16{,}7/17 = \mathbf{0{,}98}$$

En comparant DEF et DERm, on constate que **DEF** (0,80) **< DERm** (0,98). Le fourrage seul est donc insuffisant. Il faut apporter un aliment concentré et calculer une nouvelle ration composée de fourrage et de concentré.

CHAPITRE X : Les apports en éléments minéraux et vitamines par le fourrage

Nous avons vu dans le chapitre III relatif à la description d'un fourrage que les cellules qui forment ce dernier contiennent de nombreuses matières minérales (calcium, phosphore, magnésium, fer, cuivre ...). Celles-ci, que nous avons classé en deux groupes : macroéléments et oligoéléments, jouent un rôle important dans la vie des cellules et se distribuent sur plusieurs sites de celles-ci (parois, cytoplasme, noyau, etc. …). On les trouve en très petite quantité (les macroéléments) dans la plante et pour certains, à l'état de traces (les oligoéléments). Mais bien que présents en faible quantité, ces éléments sont néanmoins indispensables à la vie aussi bien pour les plantes que pour les animaux. Le fourrage qui est une plante, couvre ses besoins en minéraux en puisant directement ces derniers dans le sol grâce à son système racinaire mais la vache qui est animal dépourvu de racines ne peut le faire de cette façon. Alors elle couvre ses besoins en mangeant le fourrage tout simplement. Mais toute la question qui reste posée, lorsqu'on établit une ration alimentaire pour une vache laitière, est de savoir si les minéraux qu'elle absorbe en mangeant du fourrage couvrent suffisamment ses besoins ou non. Cette question sera examinée en détail et à travers des exemples, dans le chapitre qui traitera du calcul de la ration alimentaire. Dans ce chapitre, nous approfondirons la connaissance du rôle et de la fonction des éléments minéraux chez la vache laitière et comment on exprime les besoins et les apports pour les éléments dits majeurs : le calcium (Ca) et le phosphore (P).

1. Rôle et fonction des éléments minéraux chez la vache laitière

Les minéraux interviennent dans :

- le fonctionnement cellulaire de l'organisme de la vache laitière,
- la composition minérale des os et du squelette,
- la composition des liquides du corps (sang, salive …),
- les influx nerveux et la contraction musculaire,
- la régulation des réactions biochimiques (phosphore pour la transformation du glucose en énergie, le fonctionnement de la thyroïde avec l'iode, etc. …),
- la vie des micro-organismes microbiens du rumen qui ont besoin de phosphore, soufre, magnésium … nécessaires à leur fonctionnement.

La carence minérale n'entraine pas toujours des pathologies visibles et facilement décelables. Leurs manifestations sont dites «silencieuses» et peuvent être à l'origine d'une baisse de l'appétit et d'une diminution de la résistance aux maladies, de la fécondité et de la production. La difficulté de diagnostiquer ces carences est encore plus accentuée dans un contexte où l'alimentation est anarchique et le rationnement peu maitrisé. Les conséquences de ces carences sont graves aussi bien pour la santé des animaux que pour les résultats économiques de l'exploitation laitière.

2. La vache, le lait et les minéraux

Source importante de calcium, le lai contient aussi d'autres macroéléments (magnésium, sodium, potassium, phosphore…) et des oligoéléments (sélénium, cuivre, zinc, manganèse…). Cette fraction minérale du lait représente environ 8 g par litre. Ce chiffre parait insignifiant, mais si on le multiplie par le volume de lait produit durant une période de lactation de 305 jours par une vache produisant en moyenne 20 litres/jour, c'est environ 50 kg de minéraux qui sont fournis par la vache. A cette quantité de minéraux mobilisés dans le lait, il faut rajouter celle nécessaire à ses différents autres besoins d'entretien et de gestation.

On détermine les quantités journalières de minéraux dont a besoin une vache laitière à l'aide du tableau de l'annexe A1. Pour une vache pesant par exemple 600 kg et produisant 20 litres de lait par jour, il lui faut en calcium et phosphore absorbables (dont nous verrons la signification plus bas) une quantité journalière de **73 grammes**. Ce qui représente une quantité totale de **46 kg** environ entre calcium et phosphore bruts[73] sur une période de lactation de 305 jours. Pour un troupeau de 10 vaches c'est **460 kg** et pour 20 vaches, **presque une tonne** (voir détails de calcul dans l'encadré ci-après). C'est énorme ! Quand on voit ces chiffres on prend

[73] On convertit le calcium absorbable en calcium brut en divisant ce dernier par un coefficient de 0,40 et le phosphore absorbable par 0,65

conscience alors de toute l'importance qui doit être accordée à l'alimentation minérale tout autant qu'à celle qu'on doit accorder à l'alimentation énergétique et protéique.

Détermination avec l'annexe A1, des besoins en Ca_{abs} et P_{abs} pour une vache de 600 kg produisant 20 litres de lait et supposé au 2ème mois de gestation).

	Ca_{abs} (grammes)	P_{abs} (grammes)
Entretien	15,4	14,5
Lactation	25	18
Gestation	0	0
Total	40,4	32,5
Total Ca_{abs} et P_{abs}	40,4 + 32,5 = **73 g**	

Il faut exprimer Ca_{abs} et P_{abs} en élément brut Ca et P

$$Ca = Ca_{abs} / 0,40 = 40,4 / 0,40 = 101 \text{ g}$$
$$P = P_{abs} / 0,65 = 32,5 / 0,65 = 50 \text{ g}$$
$$\text{Total } Ca + P = 101 + 50 = 151 \text{ g}$$

Le besoin total sur 305 jours de lactation est de :

151 g * 305 = 46 055 g	≈	**46 kg** pour une vache
46 kg * 10	≈	**460 kg** pour 10 vaches
46 kg * 20	≈	**920 kg** pour 20 vaches

3. Combler les besoins de la vache laitière en minéraux

Heureusement, une grande partie de ces minéraux est comprise dans la composition chimique du fourrage, autrement l'éleveur se ruine dès sa première année s'il doit acheter toute cette alimentation minérale. Vive la nature qui les produit « gratuitement » en les incorporant discrètement dans les fourrages. Mais cette situation heureuse, n'est pas toujours le cas, en particulier pour les vaches et les élevages hautement productifs auquel cas il faut avoir recours à des complémentations de la ration par des produits dits « suppléments minéraux ». C'est le cas principalement pour le calcium et le phosphore car ces derniers représentent à eux deux, 75% des minéraux de l'organisme. Pour les autres éléments («macro ou oligo»), l'apport des fourrages est généralement suffisant sauf parfois[74] pour le sodium (Na) qu'on apporte à la vache en mettant à sa disposition une pierre de sel à lécher en libre-service.

4. Principe de calcul de l'alimentation minérale de la vache laitière

Lorsqu'on calcule une ration alimentaire pour la vache laitière, on commence par définir les besoins de la vache selon son poids, sa production laitière et son stade de gestation en se référant à l'annexe A1. Dans ce tableau les besoins journaliers en minéraux sont exprimés en gramme de calcium ou phosphore **absorbable** notés Ca_{abs} et P_{abs}. Le qualificatif absorbable exprime le fait que les besoins sont exprimés en quantités absorbables au niveau du tube digestif tel que

$$Ca_{abs} = Ca \times 40\% \qquad \text{et} \qquad P_{abs} = P \times 65\%$$

Il est important de bien saisir cette nuance, car en général les suppléments minéraux commerciaux sont étiquetés en teneur totale du minéral (ou autrement dit en teneur brute) représentés par les symboles Ca et P,

[74] Cet apport est à nuancer, car dans de nombreuses situations les sols peuvent être bien pourvus en Na. Par conséquent les fourrages peuvent également en être bien pourvus et suffisant pour combler les besoins en cet élément.

alors que les besoins sont exprimés en teneur absorbable Ca_{abs} et P_{abs}. Il faut donc faire des conversions pour calculer les bonnes doses à distribuer. Les déficits de Ca_{abs} de P_{abs} à combler deviennent alors

$$\mathbf{Ca = Ca_{abs}/0,40} \qquad \text{et} \qquad \mathbf{P = P_{abs}/0,65}$$

Exemple 1

Besoins en minéraux établis par l'annexe A1 pour une vache laitière pesant 600 kg, produisant 27 litres/jour en 5ème semaine de gestation

Besoins	Ca_{abs} (g/j)	P_{abs} (g/j)
Entretien	15,4	14,5
Production lait	33,8	24,3
Gestation	0	0
Total	**49,2**	**38,8**

Elle reçoit une ration à base d'ensilage de vesce-avoine complémentée par de l'orge grain et des drêches de brasserie

Ration	% MS	Ca_{abs} (g/kg MS)	P_{abs} (g/kg MS)
Vesce-avoine ensilage	36	4,3	1,8
Orge	86,7	0,5	3,0
Drêches d'orge de brasserie	91,9	1,3	4,9

Bilan entre les besoins et les apports de la ration

	kg MS	Ca_{abs} (g/j)		P_{abs} (g/j)	
		g/kg MS	g total	g/kg MS	g total
Ensilage de vesce-avoine	13,6	4,3	57,9	1,8	25
Orge en grain	4,5	0,5	2,3	3,0	14
Drêches d'orge de brasserie	1,9	1,3	2,4	4,9	9
Total apports			**62,6**		**47**
Total besoins			**49,2**		**38,8**
Déficit ou excédent (Apports - Besoins)			**13,4**		**8,7**

La ration ne présente pas de déficit et elle est légèrement excédentaire en calcium et en phosphore. On peut donc la considérer équilibrée. Il n'y aucun supplément minéral à rajouter.

Exemple 2

Supposons maintenant que la ration n'est pas équilibrée au point de vue minéral et qu'elle présente le bilan déficitaire suivant en calcium et en phosphore.

	Quantité kg MS	Ca_{abs} (g/j)		P_{abs} (g/j)	
		g/kg MS	g total	g/kg MS	g total
Ensilage de vesce-avoine	13,6	1,3	17,7	1,6	22
Orge en grain	4,5	4	18,0	0,8	4
Drêches d'orge de brasserie	1,9	6,3	11,8	2,3	4
Total apports			**47,6**		**30**
Total besoins			**49,2**		**38,8**
Déficit ou excédent (Apports - Besoins)			**-1,6**		**-9,1**

Il faut toujours raisonner la complémentation minérale sur la base de l'élément qui présente le plus grand déficit. Ici c'est le phosphore, il faut donc ajouter un complément phosphaté. Mais ces éléments sont étiquetés dans le commerce en valeur brute seulement (Ca ou P). Il faut donc exprimer les déficits de Ca_{abs} et P_{abs} en Ca et en P pour les faire correspondre au dosage des produits commerciaux. **On divise alors Ca_{abs} par un coefficient de 0,40 et le P_{abs} par un coefficient de 0,65**.

	Ca	**P**
Déficit Ca et P absorbables	1,6	9,1
Coefficient de conversion	0,40	0,65
Ca et P commerciaux en g	**4**	**14**

Pour trouver dans le commerce un supplément minéral le plus proche possible de celui qui peut combler le déficit constaté, on calcule le rapport Ca/P des déficits et on le compare à celui des produits commerciaux.

Rapport Ca/P des déficits

Déficits Ca/P = 4/14 = **0,3**

Dans ce cas, on cherche dans le commerce un aliment minéral qui présente un rapport de ses teneurs Ca/P proche de 0,3. On prend en exemple un aliment minéral fictif qui dose 5% de Ca et 12,5% de P soit une teneur de 50 g de Ca et 125 g de P par kg de MS de ce produit et on calcule son rapport Ca/P.

Rapport Ca/P du supplément minéral

Aliment Ca/P = 50/125 = **0,4**

Le rapport Ca/P de l'aliment (0,4) est proche de celui du déficit (0,3), donc, on peut l'utiliser comme supplément minéral.

Comme c'est le phosphore qui présente le plus grand déficit, on calcule la quantité à distribuer de ce produit en divisant le déficit en P par la teneur en P du supplément. On calculera de la même manière si le Ca était l'élément le plus déficitaire.

Quantité du supplément minéral à distribuer

Comme 100 g du supplément contiennent 12,5 g de P, on calcule la quantité nécessaire par une règle de trois :

Déficit en P/teneur de l'aliment en P = (14/12,5) * 100 = **112 g**

Vérification du comblement du déficit

P = 112 x 12,5% = **14 g**

Ca = 112 x 5% = **6 g**

Le déficit a bien été comblé. Mais dans la réalité on ne trouve pas toujours un aliment minéral dans le commerce dont le rapport des teneurs en Ca et P est identique à celui du déficit de la ration. On fera donc des approximations autant proches que possible.

5. Les vitamines

Les vitamines recouvrent un ensemble de substances organiques que l'on trouve en très faibles quantités dans la composition des fourrages et des concentrés mais généralement suffisantes pour couvrir les besoins de la vache sauf pour la vitamine D. Quand l'alimentation est à base de foin seulement et manque d'herbe fraîche certains déficits peuvent apparaître aussi. Les vitamines, utilisées à très faible dose (de l'ordre du nano et microgramme) sont indispensables au bon fonctionnement de l'organisme. Leur carence perturbe la croissance, la gestation et la production laitière et peut entrainer des troubles graves comme le rachitisme. Mais l'excès peut aussi être néfaste voir toxique. Il faut donc confier, comme pour les oligo-éléments, la décision au vétérinaire d'administrer ou non des vitamines. Il faut aussi bien comprendre que si les vitamines sont essentielles à une bonne santé de la vache et une bonne production laitière, elles sont sans effet si son alimentation est déséquilibrée au plan de l'énergie, des protéines et des minéraux. Ce n'est pas un remède miracle contre la mauvaise ou la sous-alimentation. **La décision de les administrer ou non ne doit être envisagée que lorsque l'alimentation équilibrée de base est assurée et jamais avant**.

On classe les vitamines en deux catégories selon le type de solvant dans lequel elles sont solubles.

- Les vitamines liposolubles : elles sont solubles seulement dans les graisses et concernent trois groupes de vitamines connues sous la désignation de vitamines A, D et E et dans lesquelles on distingue encore des sous-catégories (A1, A2…).
- Les vitamines hydrosolubles : elles sont solubles dans l'eau et ne comportent qu'un seul groupe : les vitamines B avec aussi des sous-catégories.

Du fait de leur solubilité dans la graisse, les vitamines A, D et E peuvent s'accumuler dans le foie ou les tissus adipeux. Il ne faut pas les administrer de manière continue. Autrement il y a risque d'une accumulation toxique dans l'organisme de la vache. C'est le vétérinaire qui décide de la fréquence, de la dose et de la voie d'administration pour ce groupe de vitamines. Les vitamines B qui sont hydrosolubles, ne s'accumulent pas dans l'organisme. Comme elles sont éliminées dans les urines et les excrétions, elles sont dépourvues d'effets toxiques. Les vitamines de ce groupe sont produites abondamment par la synthèse microbienne du rumen et les risques de carence pour ces dernières sont faibles. Si toutefois, le besoin est confirmé par le vétérinaire un apport quotidien est possible dans l'eau ou l'alimentation sans risque de toxicité.

Les teneurs en vitamines dans quelques fourrages et concentrés courants ainsi que les besoins de la vache laitière sont présentés dans les tableaux X.1 et X.2. Ce sont des informations à titre indicatif seulement et non des recommandations. Les vitamines ne sont pas mesurées en grammes mais en **UI (unités internationales)** et c'est comme cela qu'elles sont étiquetées sur les produits commerciaux. C'est une unité de mesure un peu déroutante car elle n'a pas d'équivalence dans le système métrique et sa valeur peut varier. On ne rentrera pas dans le détail, il faut juste savoir que « l'**UI** est une mesure normalisée à l'échelle internationale de l'effet biologique d'une substance lorsque la dose administrée est égale à 1 UI ». Par exemple, une UI pour la vitamine A est égale à 0,3 microgramme, mais pour la vitamine D une UI est égale à 25 nanogrammes : c'est-à-dire qu'il faut 0,3 microgramme pour que la vitamine A ait un effet biologique et seulement 25 nanogrammes pour la vitamine D.

Tableau X.1. Teneurs en vitamines A, D et E en UI/kg MS des principaux aliments de la vache laitière[75]

	Vitamine A	Vitamine D	Vitamine E
Céréales	1500 - 2000	--	15 - 30
Tourteaux		--	15 - 20
Luzerne déshydratée	60 - 80000	--	150 - 200
Fourrage vert	80 - 120000	30	20
Ensilage maïs	5000	200	5
Ensilage graminée	8000	200	5
Ensilage légumineuse	3000	200	5
Foins	45000	50	5

Tableau X.2. Apports recommandés en vitamines A, D et E en UI/kg MS de la ration

	Vitamine A	**Vitamine D**	**Vitamine E**
Vaches en début lactation	4000	1200	15
Vaches en pleine lactation	3200	1000	15
Vaches taries	4000	1200	15

[75] Les données des tableaux X.1 et X.E sont extraites de : L. DELTEIL et *al* : Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Tome 1, p 235. Educagri Editions. 2018

Pierre de Sel pur (99% de NaCl)

ETIQUETTE

Vitamines
Vitamines A : 1 000 000 UI
Vitamines D3 : 200 000 UI
Vitamines B1 : 200 mg/kg
Vitamines E : 8000 mg/kg

Oligo-éléments
Cuivre (dont chélates) : 5020 (1020) mg/kg
Zinc (dont chélates) : 10 009 (2509) mg/kg
Manganèse (dont chélates) : 10 001 (2501) mg/kg
Iode (iodate de calcium) : 1000 mg/kg
Cobalt (carbonate) : 100 mg/kg
Sélénium (sélénite de sodium) : 50 mg/kg

Valeurs nutritionnelles (% brut)
Phosphore : 12.5%
Calcium : 5%
Magnésium : 17%

Recommandations d'utilisation
Vaches laitières : 100 à 150 g/animal/ jour en fonction de la ration de base et de la production

Figure X.1. Exemple de produit combinant matières minérales et vitamines commercialisé sous l'acronyme CMV (composé minéral vitaminé) avec étiquette détaillée. Le sodium (Na) est sous forme de pierre à lécher.

TROISIEME PARTIE

L'ANALYSE FOURRAGERE ET LES EQUATIONS DE PREDICTION

CHAPITRE XI : L'analyse fourragère

Ce qu'on appelle communément l'analyse fourragère est en réalité l'analyse de la composition chimique du fourrage. Elle n'exprime pas sa valeur nutritive, comme le pensait notre brave paysan dont l'histoire est racontée en introduction du livre. La connaissance de celle-ci en UFL, PDI… est une deuxième étape qui succède à l'analyse chimique. Elle est calculée en intégrant les résultats de l'analyse dans des équations mathématiques. Sur ce point, aami Lakhar avait raison. Ce qu'il a eu entre les mains était une analyse de la composition chimique de son fourrage et non sa valeur alimentaire. Voyons un peu plus en détail ce qu'elle contenait avant d'aborder dans les prochains chapitres comment calculer la valeur alimentaire.

1. Les éléments dosés par l'analyse chimique

Un fourrage est formé par une multitude de composés chimiques et il est inutile de les doser tous si on ne sait pas comment ni dans quels rapports ils contribuent à sa valeur nutritive. Après de nombreuses années de recherches voire des décennies on a admis deux principes pour guider le choix des éléments chimiques à doser dans un fourrage pour calculer sa valeur nutritive :

- la transformation des composés chimiques d'un fourrage en énergie utile pour l'animal est conditionnée par la digestibilité (**d**) de ses composés glucidiques pariétaux et non de celle l'ensemble des glucides et autres composés qui peuvent participer à l'énergie;

- la MAT du fourrage fournit les protéines utiles à la vache (sous forme alimentaire et microbienne) et sa transformation dépend de sa dégradabilité théorique (**DT**) dans le rumen et de sa digestibilité réelle dans l'intestin (**dr**).

A partir de ces principes on a restreint l'analyse chimique d'un fourrage aux seuls éléments significatifs, de la « formule développée d'un fourrage » (tableau III.1 page 40). Voici un exemple d'analyse fourragère qui illustre les éléments analysés.

	%		g/kg MS				
Type de fourrage	**MS**	**DCS**	**MM**	**MAT**	**CB**	**Ca_{abs}**	**P_{abs}**
Foin	86	55	80	75	350	1,4	1,2
MS : matière sèche ; **DCS** : digestibilité cellulase de la matière sèche ; **MM** : matière minérale ; **MAT** : matière azotée totale ; **CB** : cellulose brute ; **Ca** : calcium ; **P** : phosphore							

2. La matière sèche (MS)

C'est sur la matière sèche que s'effectue l'analyse chimique d'un fourrage car il est plus pratique d'exprimer les éléments dosés (matière organique, matière minérale, matière azotée …) en g/kg de matière sèche. Celle-ci, débarrassée du poids variable de l'eau est constante alors que le poids frais ne l'est pas.

La matière sèche est déterminée en laboratoire par dessiccation d'un échantillon frais de fourrage dans une étuve qui est réglée à des températures et temps de séchage variables selon l'objectif de l'analyse et la nature du fourrage :

- 103° C pendant 24 heures pour un fourrage dont on veut déterminer la MS seulement sans analyser sa composition chimique,

- 60° C pendant 72 heures pour un fourrage dont on veut déterminer la MS et analyser sa composition chimique,

- pour les ensilages, en plus d'un échantillon séché à 60° C pendant 72 heures pour l'analyse chimique, un deuxième échantillon est séché à 80° C pendant 48 heures afin de déterminer la perte des produits volatils à l'étuve et calculer les facteurs de correction. Nous en examinerons la signification aux chapitres suivants.

La matière sèche est exprimée en % du poids frais (PF) avant dessiccation, par l'expression :

$$MS\ \% = \frac{MS}{PF}\ \text{X}\ 100$$

Elle dépend de l'état de conservation du fourrage et on considère approximativement sa valeur à environ :

- 15 % pour un fourrage vert,
- 30 à 55% pour un ensilage selon le type de fourrage et la technique d'ensilage (maïs en balle ronde enrubannée par exemple en Algérie),
- 85 % pour un foin.

3. La matière minérale (MM)

La matière minérale d'un fourrage est déterminée par calcination de sa matière sèche dans un four à 550° C pendant 6 heures et pesée du résidu qui en est issu. On exprime sa teneur en gramme par kg de matière sèche (g/kg MS) par l'expression :

$$MM\ g/kg\ MS = \frac{MM}{MS} \text{ X } 1000$$

On effectue ensuite des analyses complémentaires sur la matière minérale pour doser les éléments minéraux majeurs du fourrage comme le calcium et le phosphore. La teneur de ces derniers est également exprimée en g/kg MS.

4. La matière organique (MO)

La masse qui a disparu lors de la calcination de la matière sèche forme la matière organique (MO). La teneur de l'échantillon en matière organique est obtenue simplement en calculant la différence entre la matière sèche et la matière minérale tel que :

$$MO\ de\ l'échantillon = \text{MS}\ de\ l'échantillon - \ MM\ de\ l'échantillon$$

On exprime la teneur de la MO du fourrage en gramme par kg de matière sèche (g/kg MS) par l'expression :

$$MO\ g/kg\ MS = 1000 - \ MM\ g/kg\ MS$$

On exprime également la proportion de la MO dans la MS par un ratio noté **kmo** tel que :

$$\mathbf{kmo}\ = \frac{1000 - \ MM}{1000}$$

Ce ratio est sans unité. Il sera utilisé dans le calcul de la valeur alimentaire des fourrages.

5. La matière azotée totale (MAT)

Pour déterminer la matière azotée totale (MAT), de l'échantillon, on dose d'abord l'azote total (N) dans la matière sèche par la méthode de Kjeldahl (chapitre V) qu'on multiplie par le coefficient 6,25, tel que :

$$\text{MAT} = \text{N x } 6{,}25$$

La matière azotée totale du fourrage est, selon l'usage qu'on en fera, exprimée soit en g/kg de MS soit en g/kg de MO. Dans le 1er cas, la formule est :

$$MAT\ g/kg\ MS = \frac{MAT}{MS} \text{ X } 1000$$

Et dans de second cas on divise la MAT exprimée en g/kg MS par kmo (proportion de la MO dans la MS) :

$$MATo\ g/kg\ MO = \frac{MAT\ g/kg\ MS}{kmo}$$

Lorsque la MAT est exprimée en fonction de la MO, elle est désignée par l'expression MAT_O. La lettre O placée en indice, indique l'expression en fonction de la MO.

6. Les composés pariétaux glucidiques dosés par la mesure de la cellulose brute (CB)

Comme déjà signalé, la paroi des cellules végétales d'un fourrage est composée de cellulose, d'hémicellulose et de pectine qui assurent une grande part des apports énergétiques à la vache laitière. Ces éléments sont regroupés sous la désignation de «composés pariétaux glucidiques». Au fur et à mesure que la plante fourragère vieillit, la lignine qui est un «composé pariétal non glucidique» imprègne la cellulose et rend celle-ci indigeste, ce qui diminue «la digestibilité» du fourrage. Il est donc important de doser les composés pariétaux glucidiques et non glucidiques d'un fourrage pour connaitre sa digestibilité.

Il existe deux méthodes pour déterminer la teneur de ces composés pariétaux. On les distingue par le nom des auteurs qui les ont mises au point. La première, utilisée dans le système français et connue sous le nom de la **méthode de Weende,** dose la **cellulose brute**, notée CB. La seconde, utilisée particulièrement dans le système nord-américain et un peu dans le système français est intitulée **méthode de Van Soest**. Elle dose trois composantes désignées par les sigles **NDF**, **ADF** et **ADL**, dont on verra la signification ci-après.

6.1. La méthode de Weende

La méthode de Weende soumet un échantillon de fourrage à une série d'opérations chimiques successives d'épuration jusqu'à l'obtention d'un résidu organique appelé **cellulose brute** (CB) dont on mesure la teneur, comme pour les éléments précédents en g/kg de masse sèche :

$$CB\ g/kg\ MS = \frac{CB}{MS}\ \text{X}\ 1000$$

Celle-ci peut également être exprimée comme pour la MAT en fonction de la matière organique et elle est à ce moment-là notée CB_O avec :

$$CBo\ g/kg\ MO = \frac{CB\ g/kg\ MS}{kmo}$$

La cellulose brute ne représente pas une substance chimique pure. C'est un mélange qui comprend la majeure partie de la cellulose de l'échantillon (mais pas la totalité), une petite partie des hémicelluloses et de la pectine et une fraction plus ou moins importante de lignine ainsi que quelques traces de matières azotées. La méthode Weende ne dose pas l'ensemble des composants pariétaux, mais son intérêt repose sur le fait que, pour un fourrage donné, il existe une relation constante entre sa cellulose brute et sa composition en parois et lignine. Si l'une diminue, l'autre aussi et inversement. De ce fait, la cellulose brute dosée par la méthode de Weende est un bon indicateur qui sert à calculer la digestibilité de la matière organique (dMO) et la valeur énergétique d'un fourrage.

6.2. La méthode de Van Soest

Contrairement à la méthode de Weende qui dose un seul élément : la cellulose brute, la méthode de Van Soest procède au fractionnement des différents constituants de la paroi végétale. Elle repose sur l'utilisation de détergents ou solvants qui permettent d'obtenir trois fractions de matières désignées par les acronymes anglais suivants :

- **NDF** pour *neutral detergent fiber* (fibres au détergent neutre). Cette fraction comprend la cellulose, l'hémicellulose et la lignine;
- **ADF** pour *acid detergent fiber* (fibres au détergent acide). Cette partie est constituée de cellulose et de lignine seulement. En la soustrayant de la NDF, on obtient la teneur en hémicellulose;
- **ADL** pour *acid detergent lignin* (lignine au détergent acide). C'est la fraction qui quantifie la lignine.

Comme pour la cellulose brute, ces indicateurs peuvent également être intégrés dans le calcul de la digestibilité du fourrage.

6.3. La digestibilité des composés pariétaux ou digestibilité cellulase de la matière sèche (DCS)

On considère que la digestibilité de la matière organique d'un fourrage et donc sa valeur alimentaire varient dans le même sens et de manière proportionnelle à sa teneur en parois et leur digestibilité. Comme la cellulose peut être plus ou moins digestible selon son degré d'imprégnation par la lignine, la seule connaissance de sa teneur (qu'elle soit obtenue par la méthode Weende ou Van Soest) s'avère généralement insuffisante pour obtenir une estimation précise de la digestibilité du fourrage. Aussi, certaines analyses fourragères fournissent une donnée sur sa digestibilité. La prise en compte de celle-ci dans le calcul de la digestibilité de la MO, permet alors d'obtenir une estimation plus précise de cette dernière. Libellée sous l'acronyme général de **DCS**, la digestibilité de la cellulose est exprimée soit en % de la matière sèche et dans ce cas elle est désignée par le terme **DcellMS** pour «digestibilité cellulase de la matière sèche», soit en % de la matière organique et elle est indiquée par le terme **DcellMO**. On la détermine en laboratoire en soumettant

un échantillon de fourrage à l'action enzymatique peptidique (pepsine) et cellulolitique (extraite d'un champignon) qui simule les conditions digestives du rumen. Par différence entre la pesée de la matière sèche initiale soumise au traitement et celle de la masse sèche résiduelle, on déduit la masse dissoute de l'échantillon et on exprime la digestibilité du fourrage analysé en % de sa matière sèche ou de sa matière organique. On évoque aussi la digestibilité de la cellulose par l'expression «digestibilité pepsine-cellulase» qui fait référence à la méthode utilisée pour la mesurer.

CHAPITRE XII : Introduction au calcul de la valeur alimentaire des fourrages avec les équations de prédiction

Le présent chapitre ainsi que les suivants sont un peu plus complexes et intègrent toutes les notions présentées dans les chapitres précédents. Ils exigent une attention plus soutenue de la part du lecteur avec parfois des retours en arrière et nécessitent idéalement, une lecture avec prise de notes pour faciliter la compréhension des calculs qui y sont présentés. Plusieurs exemples concrets seront traités pour faciliter et consolider leur compréhension.

1. Des équations pour prédire la valeur nutritive d'un fourrage

La valeur nutritive d'un fourrage est composée par quatre éléments.

- La teneur en énergie exprimée en UFL/kg MS.
- La teneur en protéines qui prend deux valeurs PDIM et PDIE exprimées g/kg MS.
- La valeur d'encombrement exprimée en UEL/kg MS.
- La teneur en éléments minéraux exprimées en g/kg MS.

Comme évoqué aux chapitres précédents, pour connaître par exemple l'énergie nette d'un fourrage ou sa teneur en protéines on effectue une série de mesures et de calculs qui font intervenir divers facteurs, dont certains ont été mesurés à l'origine directement par des expérimentations sur l'animal, On a observé durant ces recherches que la valeur alimentaire d'un fourrage n'est pas constante. Sa digestibilité par exemple varie avec le stade végétatif à cause de la lignine qui imprègne la cellulose. On a alors établi un lien entre la digestibilité et la teneur en glucides pariétaux et démontré expérimentalement que plus un fourrage est riche en glucides pariétaux moins il est digestible.

Par des comparaisons statistiques de la composition chimique d'un grand nombre d'échantillons de fourrage et des résultats de digestibilité de la matière organique (**dMO**), mesurées sur l'animal ou artificiellement au laboratoire on a alors formalisé ce lien par des formules mathématiques, qu'on a appelé « équations de prédiction de la valeur alimentaire ». Comme par exemple ici on calcule la digestibilité de la matière organique d'un foin à partir de la connaissance de sa teneur en cellulose brute (CB) et en matière azotée totale (MAT) fournies par l'analyse chimique.

$$\mathbf{dMO = 93{,}2 - 0{,}104\ CB + 0{,}025\ MAT}$$

L'analyse chimique ne fournit donc pas directement la valeur alimentaire du fourrage mais elle est un outil précieux qui permet d'obtenir les données essentielles sur sa composition à partir desquelles on établit par calcul sa valeur alimentaire. Ces calculs sont effectués à l'aide des équations de prédiction.

2. Les équations de prédiction et leur adéquation aux fourrages algériens

L'Algérie et les pays du Maghreb en général ne disposent pas, pour des raisons historiques, de faiblesse de la recherche agronomique, etc.… d'équations de prédiction propres pour calculer la valeur alimentaire des fourrages. On y utilise par défaut les équations de prédiction établies par le système d'évaluation de l'INRA France. Il y a comme nous le verrons plus loin, une grande variété d'équations car elles ont été développées dans le contexte des régions tempérées où la typologie fourragère est diversifiée au point de vue :

- de ses origines géobotaniques (prairie de plaine ou de montagne),
- de sa nature et de sa composition floristique (graminées ou légumineuses, culture annuelle ou pluriannuelle …),
- des méthodes de récolte (stade de végétation) et de conservation (fourrage vert, foin ou ensilage …).

Cette typologie n'a pas, son équivalent en Algérie. Notre gamme de produits fourragers est moins diversifiée par le climat mais beaucoup aussi par le recul de ses prairies naturelles[76] dont la surface est passée, dans les régions telliennes, de deux millions d'hectares en 1845 à environ 25000 hectares de nos jours et aussi à cause

[76] Les prairies naturelles permanentes en Algérie par A. ABDELGUERFI et M. HAKIMI, dans Ann. Inst. Nat. Agron. El-Harrach, 1990, vol. 14, N° 1-2, pp. l – 12.

de nos politiques laitières erratiques sans liens entre le potentiel fourrager des zones écologiques et la localisation des unités de production laitière.

Du fait des différences agricoles, géobotaniques, environnementales, politiques et technologiques entre ces deux régions géographiques, l'application de ces équations au contexte de la production fourragère algérienne est questionnable et elles ne sont pas toutes applicables. L'utilisation d'un certain nombre d'entre elles reste toutefois possible soit directement soit par des extrapolations qu'il faut appliquer avec prudence pour minimiser les approximations. Nous avons utilisé dans les chapitres suivants, plusieurs exemples de calcul possibles qui couvrent à peu près ou potentiellement le spectre des produits fourragers que l'on retrouve aujourd'hui en Algérie ou qui sont en émergence comme l'ensilage en balle ronde enrubannée du maïs fourrager et des céréales immatures.

Dans les tableaux II.1 et II.2 du chapitre II est illustrée la typologie des productions fourragères en Algérie, en nature, surface et volume, en comparaison avec celle de deux autres régions laitières du monde prises en exemple, la France et la province du Québec au Canada.

La structure de l'offre fourragère pour la France et le Québec est marquée essentiellement par le fourrage à base d'herbe de prairie et de maïs ensilage. Ils représentent en surface, 94% de l'offre pour la France et 100% pour le Québec. Pour l'Algérie cette dernière ne représente qu'environ 3% si on exclut la jachère fauchée (qui n'est pas en réalité une prairie[77], mais une pelouse au sens botanique du terme) alors que les cultures fourragères annuelles (essentiellement de la vesce-avoine) représentent près de 70%. Les équations de prédiction produites par la recherche française ou canadienne épousent la typologie fourragère de leur pays. On va trouver beaucoup d'équations pour les fourrages à base d'herbe de prairies et de maïs fourrager et très peu ou presque rien pour les fourrages issus des cultures annuelles (hormis le maïs fourrager) et pas du tout pour les jachères. C'est ce qui rend délicat l'application de ces équations au contexte de la production fourragère en Algérie. Mais comme dit l'adage «Faute de bœuf, on fait labourer par son âne», en effectuant quelques extrapolations, entre prairies et jachères fauchées par exemple ou en appliquant pour la vesce-avoine les équations pour les fourrages à base de graminées et ceux relatifs au légumineuses au prorata de ces derniers. C'est ce que nous verrons dans les exemples de calculs qui seront traités aux chapitres suivants.

Les équations qui y sont présentées sont extraites des tables INRA 2007 (mises à jour 2010)[78]. Bien qu'une nouvelle version de ces tables fût éditée en 2018, nous nous sommes volontairement limités à celle de 2010. Par sa relative simplicité, cette édition est en partie applicable à nos élevages et permet encore des calculs manuels (bien qu'un peu complexes) des valeurs fourragères et des rations alimentaires. Il faut donc considérer ce qui suit comme une explication approfondie et commentée de ces équations et qui à défaut et/ou dans l'attente d'un système d'alimentation national propre, représentent une alternative valable comme outil de connaissance de nos fourrages et de rationnement des vaches laitières dans nos élevages.

[77] On désigne par prairies des zones enherbées qui restent en place plusieurs années et productives même en été. On peut y effectuer jusqu'à trois fauches par an avec un rendement compris entre 4 et 15 t MS/ha mais qui peut varier du simple au double selon les années. Ce sont des formations végétales rencontrées sous des climats qui ne connaissent pas de sécheresse d'été ou peu. Sous le climat méditerranéen sec en été, on parle plutôt de pelouse. Formées en général d'espèces herbacées annuelles ou bisannuelles, elles montent en graines et atteignent la sénescence en fin de printemps. Elles sont sèches durant l'été et ne reverdissent qu'avec les pluies d'automne. On y effectue une seule coupe en fin de printemps qui donne bon an mal an un rendement autour de 2 t MS/ha.

[78] Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – Valeurs des aliments, tables INRA 2007 (mises à jour 2010). Editions Quae.

CHAPITRE XIII : Les équations de prédiction de la valeur alimentaire d'un fourrage

Ne vous affolez pas à la lecture de la série d'équations qui va suivre. Toutes les explications sur leurs applications seront fournies au chapitre XIV et XVI par des exemples de calculs concrets. A cette étape prenez-en simplement connaissance et surtout lisez bien les explications qui sont fournies en tête de chaque tableau. Les équations sont présentées sur 11 tableaux dans une forme qui respecte la typologie fourragère fournie au tableau II.1 et dans un ordre successif des paramètres qui déterminent les étapes de calcul de la valeur alimentaire d'un fourrage :

- énergie en UFL,
- protéines en PDIN et PDIE,
- valeur d'encombrement en UEL.

Nous n'avons présenté que les équations que nous avons jugé utiles et applicables au contexte de l'Algérie et du Maghreb tant dans le cadre des pratiques fourragères actuelles que de celles qui sont appelées à se développer comme les techniques d'ensilage. Celles-ci émergent déjà dans certaines régions où la culture du maïs fourrager se développe. Nous présumons que ces pratiques ne manqueront pas de s'élargir aussi aux fourrages à base d'herbe, de sorgho ou de cultures annuelles comme la vesce-avoine et autres mélanges à base de triticale, orge, pois, féverole … et des céréales immatures.

Nous avons gardé les expressions prairies permanentes et prairies temporaires, empruntées à la sémantique des tables INRA et aux définitions fournies au chapitre I, mais avec des significations quelque peu nuancées. Pour prairie permanente on entend les prairies de montagne qui ne subissent généralement pas d'opérations culturales (labour, semis …) et dont la production fourragère est fournie par une végétation naturelle. Ces formations végétales peuvent aussi subir certaines pratiques culturales pour améliorer leur productivité.

Nous avons assimilé à prairies temporaires des productions végétales qui peuvent avoir une finalité fourragère mais dont le cycle de vie se limite à une année (vu le contexte climatique) contrairement au sens INRA qui confère à ces dernières des cycles de vie plus long de 4 à 5 ans (chapitre I). Les équations de prédiction pour ces dernières varient selon les dominances des graminées ou des légumineuses et peuvent être extrapolées aux jachères fauchées ou pâturées, à la végétation naturelle excluant la steppe (que nous n'abordons pas dans cet ouvrage) se développant par exemple dans les vergers de la Mitidja entre la fin de l'automne et le printemps, et même aux cultures fourragères annuelles comme la vesce-avoine ou tout autre mélange quand celles-ci ne disposent pas d'équations propres.

Nous avons volontairement fait cette entorse à l'orthodoxie sémantique des tables INRA pour nous donner la possibilité d'extrapoler des équations de prédiction à des productions fourragères qui ne figurent pas dans ces tables. Cette démarche est bien explicitée dans les exemples qui suivront aux chapitres XIV et XVI qui traiteront du foin de prairie de montagne, du fourrage de jachère fauchée ou de la vesce-avoine.

1. Équations de prédiction de la valeur énergétique

1.1. Rappel des fondements théoriques de la détermination de la valeur énergétique en UFL

Nous avons vu dans le chapitre VI consacré aux fondements théoriques et pratiques du calcul de la valeur énergétique d'un fourrage que celle-ci, exprimée en unité fourragère lait (UFL), est égale à son énergie nette de lactation (ENL) rapportée à celle de l'orge de référence qui est fixée à 1700 kcal. Soit :

$$\textbf{Valeur énergétique d'un fourrage (UFL)} = \frac{\textbf{ENL kcal}}{\textbf{1700 kcal}}$$

Avec

$$\mathbf{ENL = EB} \times \mathbf{dE} \times \mathbf{EM/ED} \times \mathbf{k_l}$$

Et

$\mathbf{k_l = 0{,}24\ q + 0{,}4632}$	avec	$\mathbf{q = \frac{EM}{EB}}$
		et
		EM[79] = EB x dE x EM/ED

Pour établir l'énergie nette de lactation (ENL) d'après ces formules, il faut donc calculer avec les équations fournies aux tableaux XIII.1, XIII.2 et XIII.3 ci-après, les paramètres :

- EB = énergie brute
- dE = digestibilité de l'énergie
- dMO = digestibilité de la matière organique (paramètre dont dépend dE)
- EM/ED = efficacité d'utilisation de l'énergie digestible

Pour k_l son équation, fournie ci-dessus est unique pour tous les fourrages quelle que soit leur nature ou origine (chapitre VI) et se calcule aisément une fois que EB, dE et EM/ED sont établies par les équations de prédiction consignées dans les tableaux ci-après.

[79] Dans le chapitre VI, l'énergie métabolisable EM est exprimée par l'équation (3) EM = ED x EM/ED et ED par l'équation (2) ED = EB x dE. On peut alors écrire : EM = EB x dE x EM/ED

1.2. Équations de prédiction de l'énergie brute (EB) et de la digestibilité de l'énergie (dE)

Les équations de prédiction de l'énergie brute sont fournies en kcal/kg de MO et non en kcal/kg de MS. Pour différencier les deux expressions, rappelons que :

- EB est l'énergie brute exprimée en fonction de la MS,
- EB_O est l'énergie brute exprimée en fonction de la MO (O placé en indice, indique la MO).

Par conséquent, lorsqu'on utilise ces équations, il faut convertir les données de l'analyse chimique qui sont fournies en g/kg de MS à g/kg de MO en les divisant par kmo[80] = (1000 - MM)/1000. Par exemple, pour la matière azotée totale :

$$\text{MATo} = \frac{\text{MAT}}{kmo}$$

Il ne faut pas oublier ensuite d'exprimer, à la fin du calcul, EB en fonction de la MS en multipliant cette fois-ci EB_O par kmo tel que :

$$\text{EB} = \text{EBo x kmo}$$

Les exemples concrets qui seront traités dans le chapitre qui suit, faciliteront vite la compréhension de ces notions.

Tableau XIII.1. Equations de prédiction de l'énergie brute (EB) et de la digestibilité de l'énergie dE

Mode de production ou origine de l'aliment		**Type de fourrage**		**EB_O** (kcal/kg de MO) **Energie brute**	**dE (%)** [81] **Digestibilité de l'énergie**
Prairie permanente de montagne		Fourrage vert		4520 + 1,735 MAT_O	0,957 dMO - 0,068
		Ensilage	préfané	EB_O vert x 1,03	1,0263 dMO – 5,723
			mi-fané	EB_O vert	0,985 dMO - 2,556
		Foin		4613 + 1,735 MAT_O	0,985 dMO - 2,556
Prairie temporaire	Dominance graminées	Fourrage vert		4460 + 1,735 MAT_O	0,957 dMO - 0,068
		Ensilage	préfané	EB_O vert x 1,03	1,0263 dMO – 5,723
			mi-fané	EB_O vert	0,985 dMO - 2,556
		Foin		4520 + 1,735 MAT	0,985 dMO - 2,556
	Dominance légumineuses	Fourrage vert		4613 + 1,735 MAT_O	0,957 dMO - 0,068
		Ensilage	préfané	EB_O vert x 1,03	1,0263 dMO – 5,723
			mi-fané	EB_O vert	0,985 dMO - 2,556
		Foin		4520 + 1,735 MAT_O	0,985 dMO - 2,556
Culture fourragère annuelle	Maïs fourrager	Fourrage vert		4487 + 2,019 MAT_O	0,997 dMO - 2,35
		Ensilage	MS < 30%	EBo vert x 1,02	1,001 dMO - 2,86
			MS > 30%	EBo vert + 25	
	Sorgho	Fourrage vert		4478 + 1,265 MAT_O	
	Céréales immatures	Fourrage vert		4520 + 1,735 MAT_O	
Luzerne		Fourrage vert		4613 + 1,735 MAT_O	
		Déshydratée		4618 + 2,051 MAT_O	1,003 dMO - 3,00
Paille					0,985 dMO - 2,949

[80] kmo = proportion de la MO dans la matière sèche (voir paragraphe relatif à la matière organique au chapitre X).
[81] Les équations permettant de calculer la dMO figurent au tableau XIII.2.

1.3. Équations de prédiction de la digestibilité de la matière organique (dMO)

Il existe deux catégories d'équations de prédiction de la digestibilité de la matière organique. La première exprime la dMO en fonction de la teneur en cellulose brute (CB) ou en fibres (ADF) et la seconde en fonction de la digestibilité cellulase de la matière sèche (DcellMS), notée aussi DCS dans certaines analyses. Si cette dernière donnée est fournie par l'analyse fourragère, il est préférable d'utiliser la seconde catégorie d'équations, pour une meilleure précision des résultats.

Tableau XIII.2. Equations de prédiction de la digestibilité de la matière organique (dMO)

Mode de production ou origine de l'aliment		**Type de fourrage**	**dMO (%) calculée à partir de CB ou ADF**	**dMO (%) calculée à partir de la DcellMS exprimée en % de la MS**	
Prairie permanente de montagne		Fourrage vert	90,1 - 0,095 CB + 0,044 MAT	0,630 DcellMS + 29,7	
			99,0 – 0,115 ADF + 0,043 MAT		
		Ensilage	105,1 - 0,123 CB	0,459 DcellMS + 40,5	
			116,5 - 0,148 ADF		
		Foin	56,5 - 0,022CB + 0,104 MAT	0,626 DcellMS + 26,8	
			58,5 - 0,026 ADF + 0,104 MAT		
Prairie temporaire	Dominance graminées	Fourrage vert	90,8 - 0,091 CB + 0,035 MAT	pur	0,630 DcellMS + 29,7
			94,3 - 0,094 ADF + 0,033 MAT	avec lég[82]	0,630 DcellMS + 26,4
		Ensilage	114,5 - 0,153 CB	0,459 DcellMS + 40,5	
			123,6 - 0,169 ADF		
		Foin	93,2 - 0,104 CB + 0,025 MAT	0,626 DcellMS + 26,8	
			104,9 - 0,127 ADF + 0,014 MAT		
	Dominance légumineuses	Fourrage vert	95,5 - 0,101 CB	0,949 DcellMS + 3,0	
			114,5 - 0,152 ADF		
		Ensilage	96,2 - 0,102 CB	0,459 DcellMS + 34,0	
			134,2 - 0,211 ADF		
		Foin	78,9 - 0,059 CB	0,626 DcellMS + 20,3	
			98,5 - 0,114 ADF		
Maïs fourrager		Fourrage vert[83]	79,4 – 0,059 CBo + 0,065 MATo	0,55 DcellMS + 0,0732 MATo + 28,5	
		Ensilage	dMO ens = dMO vert	dMO ens = dMO vert	
Luzerne		Déshydratée	65,9 - 0,0919 (ADF - 298,3)	0,896 DcellMS - 0,99	

[82] Avec légumineuses
[83] Attention! Ici la cellulose brute (CBo) et la matière azotée totale (MATo) sont exprimées en g/ kgMO

1.4. Équation de prédiction du rapport EM/ED

Rappel : le rapport EM/ED rend compte des pertes d'énergie dans les urines et sous forme de gaz (méthane, CO_2 …). Il exprime l'efficacité d'utilisation de l'énergie digestible (ED) pour la transformer en énergie métabolisable (chapitre VI).

L'équation qui permet de calculer ce rapport est unique et commune à tous les fourrages. Elle dépend des teneurs en cellulose brute et matières azotées exprimées en g/kg de MO notées **CBo** et **MATo** et du niveau alimentaire[84] noté **NA** auquel les mesures de digestibilité ont été réalisées. Ce dernier varie en fonction du type de fourrage ou de l'aliment considéré selon le tableau ci-après.

Tableau XIII.3. Équation de prédiction du rapport EM/ED et niveaux alimentaires moyens des mesures de digestibilité selon les types d'aliments

$\frac{\mathbf{EM}}{\mathbf{ED}}$	**NA** (Niveau alimentaire)[85]	
$\frac{\mathbf{84,17 - 0,0099\ CBo - 0,0196\ MATo + 2,21\ NA}}{\mathbf{100}}$	Fourrage vert	1,70
	Ensilages d'herbe	1,50
	Maïs fourrager en vert ou ensilé	1,20
	Foin	1,35
	Paille	0,75
	Aliments concentrés	1,00

Enfin, comme mentionné précédemment il faut convertir les données fournies par l'analyse chimique sur la cellulose brute et les matières azotées de g/kg de MS à g/kg de MO en les divisant par kmo tel que :

$$\mathrm{CBo} = \frac{\mathrm{CB}}{\mathrm{kmo}} \quad \text{et} \quad \mathrm{MATo} = \frac{\mathrm{MAT}}{\mathrm{kmo}}$$

[84] Le niveau alimentaire (**NA**) est le rapport des quantités d'aliment ingérées (QI) au poids de l'animal. Selon l'usage qui est fait de ce rapport, le poids de l'animal peut être exprimé en poids métabolique ($P^{0,75}$) ou en poids vif. Dans le premier cas, on mesure le NA en g de QI / kg de poids métabolique et dans le second en QI % du poids vif. On exprime également NA en grammes de matière organique digestible ingérée (MODI) rapporté au poids métabolique divisé par le besoin d'entretien de l'animal. Dans les opérations de mesure de digestibilité on utilise le mouton dit standard (mouton mâle castré de race Texel de deux ans et pesant 60 kg) dont les besoins d'entretien sont de 23 g de MODI/kg de poids métabolique et dans ce cas le NA est exprimé en g MODI / kg $P^{0,75}$ / 23.

[85] Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – Valeurs des aliments, tables INRA 2007, mises à jour 2010. Editions Quae. Page 161.

2. Équations de prédiction de la valeur azotée

2.1. Rappel des fondements théoriques de la détermination de la valeur azotée en PDIN et PDIE

La valeur azotée d'un fourrage est composée par trois éléments :

- PDIA pour protéines d'origine alimentaire
- $PDIM_N$ pour protéines d'origine microbienne permises par l'azote
- $PDIM_E$ pour protéines d'origine microbienne permises par l'énergie

Leur calcul permet d'attribuer à un fourrage deux valeurs azotées PDIN et PDIE tel que :

$$PDIN = PDIA + PDIM_N$$
$$PDIE = PDIA + PDIM_E$$

Nous savons par ce qui a déjà été présenté au chapitre VII que :

$$\mathbf{PDIA = 1{,}11 \times MAT\ (1\text{-}DT) \times dr}$$

$$\mathbf{PDIM_N = 0{,}64 \times MAT\ (DT - 0{,}10)}$$

$$\mathbf{PDIM_E = 0{,}093 \times MOF}$$

Avec

$$\mathbf{MOF = MOD - (PF + MG + MANDS)}$$

La MAT est fournie par l'analyse chimique du fourrage tandis que DT, dr et MOF sont des inconnues qu'il faut déterminer à l'aide des équations et des données des tableaux XIII.4 à XIII.7

Remarque : Pour les ensilages et les foins, il y a deux manières de calculer la DT selon qu'on dispose d'une analyse d'un échantillon prélevé directement sur l'ensilage ou le foin ou d'une analyse effectuée sur le fourrage vert correspondant avant ensilage ou fanage. Dans le premier cas, on utilise les équations fournies au tableau XIII.4 ci-après et dans le second cas on utilisera les équations fournies au tableau XIII.9. Ces cas seront traités par des exemples de calcul au chapitre suivant.

2.2. Équations de prédiction de la dégradabilité théorique de la matière azoté dans le rumen (DT)

Tableau XIII.4. Équations de prédiction de la dégradabilité théorique (DT) de la matière azotée dans le rumen pour les fourrages verts, ensilage et foin à partir de leur composition chimique

Mode de production ou origine de l'aliment		Type de fourrage		DT (%)
Prairie permanente de montagne		Fourrage vert	1er cycle	$55,6 + 0,14\ MAT_{vert} - 0,00017MAT^2_{vert}$
			Autre cycle[86]	$51,2 + 0,14\ MAT_{vert} - 0,00017MAT^2_{vert}$
		Ensilage	1er cycle	$76,2 + 0,088\ MAT_{ens} - 0,00011\ MAT^2_{ens} - 0,25\ MS_{ens}$
			Autre cycle	$73,7 + 0,088\ MAT_{ens} - 0,00011\ MAT^2_{ens} - 0,25\ MS_{ens}$
		Foin	1er cycle	$52,7 + 0,12\ MAT_{foin} - 0,00018\ MAT^2_{foin}$
			Autre cycle	$50,8 + 0,12\ MAT_{foin} - 0,00018\ MAT^2_{foin}$
Prairie temporaire	Dominance graminées	Fourrage vert	1er cycle	$60 + 0,14\ MAT_{vert} - 0,00017MAT^2_{vert}$
			Autre cycle	$55,8 + 0,14\ MAT_{vert} - 0,00017MAT^2_{vert}$
		Ensilage	1er cycle	$78,6 + 0,088\ MAT_{ens} - 0,00011\ MAT^2_{ens} - 0,25\ MS_{ens}$
			Autre cycle	$76,2 + 0,088\ MAT_{ens} - 0,00011\ MAT^2_{ens} - 0,25\ MS_{ens}$
		Foin	1er cycle	$57 + 0,12\ MAT_{foin} - 0,00018\ MAT^2_{foin}$
			Autre cycle	$54 + 0,12\ MAT_{foin} - 0,00018\ MAT^2_{foin}$
	Dominance légumineuses	Fourrage vert		$58 + 0,14\ MAT_{vert} - 0,00017MAT^2_{vert}$
		Ensilage		$77,9 + 0,088\ MAT_{ens} - 0,00011\ MAT^2_{ens} - 0,25\ MS_{ens}$
		Foin		$55,8 + 0,12\ MAT_{foin} - 0,00018\ MAT^2_{foin}$
Culture fourragère annuelle	Maïs fourrager	Ensilage		72
	Céréales immatures	Ensilage		72
Paille				60

<u>Remarque</u> : Si un conservateur pour ensilage est utilisé, $DT = 0,96\ DT_{\text{ensilage sans conservateur}}$

[86] Cette distinction «1er cycle» et «autre cycle» ne s'applique que dans les prairies des climats tempérés sur lesquelles on peut effectuer plusieurs coupes durant le printemps et l'été. La végétation y est constituée d'espèces herbacées vivaces qui, après chaque coupe repart un nouveau cycle de croissance (voir chapitre I). En Algérie et en particulier pour ce qui est appelé « jachère fauchée ou pâturée», il s'agit d'une végétation naturelle de type méditerranéenne qui ne persiste pas au-delà du printemps à cause de la sécheresse estivale, sauf dans les zones plus ou moins marécageuses ou en montagne. Formée d'espèces annuelles ou bisannuelles celle-ci est désignée généralement par le terme de «pelouse» par les botanistes pour la distinguer de la «prairie» et ne présente qu'un seul cycle de production par an. On choisira donc toujours l'équation correspondant à «1er cycle» en considérant qu'il s'agit du seul et unique cycle sauf indication contraire.

2.3. Équation de prédiction de la digestibilité réelle des acides aminés d'origine alimentaire dans l'intestin grêle (dr)

Tableau XIII.5. Équation de prédiction de la digestibilité réelle (dr) des acides aminés d'origine alimentaire

Valeurs de dr (%)
dr = 100 x [MAND - PANDI]/MAND
Avec
MAND = 1,11 x MAT (1 - DT)
PANDI = 7,9 + 0,08 MAT - 0,00033 MAT^2 + Δ_1 + Δ_2 + Δ_3

Valeurs de Δ
Δ_1 = - 1,9 au 1er cycle et 0 pour les autres cycles
Δ_2 = - 2,3 pour les graminées et prairies permanentes et 0 pour les légumineuses
Δ_3 = - 2,0 pour les fourrages verts et 0 pour les fourrages conservés

MAND = Matière azotée réellement non dégradable dans le rumen ou aussi définie (tables INRA 2007) comme matière azotée apparemment non digestible dans l'ensemble du tube digestif
PANDI = Protéines alimentaires non digérées dans l'intestin
Pour les significations de MAND et PANDI voir le chapitre VII.

Tableau XIII.6. Autres valeurs de la digestibilité réelle des acides aminés d'origine alimentaire (dr)

Mode de production ou origine de l'aliment		**Type de fourrage**	**dr**
Culture fourragère annuelle	Maïs fourrager	Ensilage	70
	Céréales immatures	Ensilage	70
	Féverole	Ensilage	55
	Pois	Ensilage	60
	Chou fourrager	Ensilage	65
Paille			70

2.4. Équation de prédiction de la Matière organique fermentescible (MOF)

La matière organique fermentescible (**MOF**) fournit aux micro-organismes du rumen l'énergie nécessaire pour effectuer la protéosynthèse (chapitre VII). On évalue la teneur en MOF d'un fourrage en soustrayant de sa matière organique digestible (MOD) l'énergie qui n'est pas utilisée directement par les micro-organismes pour la protéosynthèse tel que les produits de fermentation des ensilages (PF), les matières grasses (MG) et les matières azotées non dégradées en sachet (MANDS) :

$$\boxed{\mathbf{MOF = MOD - (PF + MG + MANDS)}}$$

- MOD se calcule en multipliant la teneur en MO (fournie par l'analyse fourragère) par sa digestibilité tel que :

$$MOD = MO \times dMO$$

- MANDS se calcule l'aide de la formule présentée au chapitre VII tel que :

$$MANDS = MAT\ (1-DT)$$

- PF et MG sont fournis directement par les tableaux XIII.7.1 et XIII.7.2.

Tableau XIII.7.1. Valeurs de PF (produits de fermentation), de MG (matières grasses) et de FC (facteurs de correction) pour différents types de fourrages et de conservation (données extraites des tables INRA 2007).

Mode de production ou origine de l'aliment	**Type de fourrage**		**PF (g/kg MS)**	**MG[87] (g/kg MS)**	**FC[88]**
Prairies permanentes de montagne et prairies temporaires à dominance graminées	Fourrage vert			25	
	Ensilage	préfané	80	25	1,04
		mi-fané	25	17	1,02
	Foin			12	
Prairies temporaires à dominance légumineuses Luzerne et trèfle	Fourrage vert			30	
	Ensilage	préfané	80	30	1,02
		mi-fané	40	20	1,01
	Foin			15	
Céréales immatures	Fourrage vert			30	
	Ensilage	préfané	50	30	--
		mi-fané	--	20	--
	Foin			15	
Vesce-avoine	Fourrage vert			30	
	Ensilage	préfané	75	30	--
		mi-fané	--	20	--
	Foin			15	
Maïs fourrager[89]	Fourrage vert			28	
	Ensilage	30% MS	100		1,03
		35% MS	80		1,02
		40% MS	60		1,02
Sorgho	Fourrage vert			28	
	Ensilage		50		--
Autres cultures fourragères annuelles — Chou fourrager	Fourrage vert			20	
Autres cultures fourragères annuelles — Colza fourrager	Fourrage vert			40	
Paille				15	

[87] Désignée par EE (extrait éthéré) dans les tables INRA 2007.
[88] FC (facteurs de correction) pour le calcul sur les ensilages. Nous verrons sa signification dans les exemples qui traitent de ce cas.
[89] Pour le maïs et le sorgho, MG est une moyenne des stades épiaison à laiteux ou pâteux.

Tableau XIII.7.2. Valeurs de PF (produits de fermentation) du maïs fourrager ensilage pour des taux de matière sèche intermédiaires entre ceux fournis par les tables INRA 2007 (en caractères gras)

% Matière sèche	PF
30	**100**
31	96
32	92
33	88
34	84
35	**80**
36	76
37	72
38	68
39	64
40	**60**

3. Équations de prédiction de la valeur d'encombrement

3.1. Rappel des fondements théoriques de la détermination de la valeur d'encombrement

La valeur d'encombrement d'un fourrage (VEF), mesurée en unité d'encombrement lait (UEL/kg de MS) se calcule par la formule présentée au chapitre VIII tel que :

VEF = 140/QIL (UEL/kg de MS).

QIL représente l'ingestibilité du fourrage chez la vache laitière, qu'il faut calculer à l'aide des équations de prédiction présentées dans le tableau XIII.8 ci-après.

3.2. Équation de prédiction de l'ingestibilité (QIL)

Tableau XIII.8. Équations de prédiction de l'ingestibilité des fourrages chez la vache laitière (QIL)

Mode de production ou origine de l'aliment		Type de fourrage		QIL
Prairie permanente de montagne		Fourrage vert		66,3 + 0,655 dMO + 0,098 MAT + 0,626 MS
		Ensilage	préfané	100,9 + 0,167 dM0 + 0,128 MAT
			mi-fané	99,3 + 0,167 dM0 + 0,128 MAT
		Foin		82,4 + 0,491 dMO + 0,114 MAT
Prairie temporaire	Dominance graminées	Fourrage vert		62,6 + 0,655 dMO + 0,098 MAT + 0,626 MS
		Ensilage	préfané	99,5 + 0,167 dM0 + 0,128 MAT
			mi-fané	97,9 + 0,167 dM0 + 0,128 MAT
		Foin		81,5 + 0,491 dMO + 0,114 MAT
	Dominance légumineuses	Fourrage vert		67,3 + 0,655 dMO + 0,098 MAT + 0,626 MS
		Ensilage	préfané	103,7 + 0,167 dM0 + 0,128 MAT
			mi-fané	102,1 + 0,167 dM0 + 0,128 MAT
		Foin		85 + 0,491 dMO + 0,114 MAT
Maïs fourrager		Ensilage		2,39 dMO + 1,44 MS – 76,4

4. Equations de prédiction pour un foin ou un ensilage à partir des données du fourrage vert correspondant

Tableau XIII.9. Equations de prédiction de la MS, de la dMO, de la DT et de la QIL d'un foin ou d'un ensilage à partir des données du fourrage vert correspondant

Type de fourrage	Conservation		%		
			MS*	**dM0**	**DT**
Prairies permanentes de montagne et temporaires à dominance graminées	Fourrage vert		MS vert	dM0 vert	DT vert
	Ensilage[90]	direct	MS ens = 0,652 MS vert + 7,91	dM0 ens = 0,920 dM0 vert + 6	DT ens[91] = 0,56 DT vert - 0,25 MS ens + 46,5
		préfané	MS ens = MS vert	dM0 ens = 0,920 dM0 vert + 4	
		mi-fané	MS ens = MS vert	dM0 ens = 0,888 dM0 vert + 5	
	Foin			dM0 foin = 0,867 dMO vert + 4,8	DT foin = 0,68 DT vert + 17,08
Prairies temporaires à dominance légumineuses et luzerne	Fourrage vert		MS vert	dM0 vert	DT vert
	Ensilage	direct	MS ens = 0,652 MS vert + 8,19	dM0 ens = 0,920 dM0 vert + 5	DT ens = 0,56 DT vert - 0,25 MS ens + 46,5
		préfané	MS ens = MS vert	dM0 ens = 0,920 dM0 vert + 3	
		mi-fané	MS ens = MS vert	dM0 ens = 0,743 dM0 vert + 12,5	
	Foin			dM0 foin = 0,659 dMO vert + 17	DT foin = 0,68 DT vert + 17,08
Trèfle violet	Fourrage vert		MS vert	dM0 vert	
	Ensilage	direct	MS ens = 0,652 MS vert + 9,25	dM0 ens = 0,920 dM0 vert - 3	
		préfané	MS ens = MS vert	--	
		mi-fané	MS ens = MS vert	dM0 ens = 0,743 dM0 vert + 12,5	
	Foin			dM0 foin = 0,415 dMO vert + 29,7	
Maïs fourrager	Fourrage vert		MS vert	dM0 vert	
	Ensilage		MS ens = 0,865 MS vert + 5,96	dM0 ens = d MO vert	

[90] Voir chapitre XIV, paragraphe 2.1 sur l'ensilage.
- Ensilage direct : MS <25 % ou séjour au sol moins de 24 heures
- Ensilage préfané : MS >25 % ou séjour au sol plus de 24 heures
- Ensilage mi-fané : 60% >MS > 50 %. Concerne les ensilages en balles rondes enrubannées.

[91] Cette équation est pour un ensilage sans conservateur. Dans le cas de l'usage d'un conservateur : DT = 0,96 $DT_{\text{ensilage sans conservateur}}$

Tableau XIII.9 (suite) : Equations de prédiction de la MM, de la MAT et de la CB d'un foin ou d'un ensilage à partir des données du fourrage vert correspondant

Type de fourrage	Conservation		g/kg MS		
			MM	**MAT**	**CB**
Prairies permanentes de montagne et temporaires à dominance graminées	Fourrage vert		MM vert	MAT vert	CB vert
	Ensilage	direct	MM ens = 1,07 MM vert + 1,50 MSv – 37,4	MAT ens = 0,81 MAT vert + 0,627 MSv + 16,1	CB ens = 0,77 CB vert + 2,16 MSv + 125
		préfané	MM ens = 0,882 MM vert + 21	MAT ens = 0,859 MAT vert + 26,3	CB ens = 0,935 CB vert + 31
		mi-fané	MM ens = 0,479 MM vert + 43,4	MAT ens = 0,926 MAT vert + 11,2	CB ens = 0,757 CB vert + 95
	Foin		MM foin = 0,796 MM vert + 14,7	MAT foin = 0,963 MAT vert - 1	CB foin = 0,927 CB vert + 42,5
Prairies temporaires à dominance légumineuse et luzerne	Fourrage vert		MM vert	MAT vert	CB vert
	Ensilage	direct	MM ens = 1,07 MM vert + 1,50 MSv – 37,4	MAT ens = 0,72 MAT vert + 0,827 MSv + 28,4	CB ens = 0,713 CB vert + 105
		préfané	MM ens = MM vert	MAT ens = MAT vert	CB ens = 0,657 CB vert + 112
		mi-fané	MM ens = 0,888 MM vert + 4,1	MAT ens = 0,874 MAT vert + 10	CB ens = 0,651 CB vert + 140
	Foin		MM foin = 0,809 MM vert + 2,4	MAT foin = 0,472 MAT vert + 83,4	CB foin = 0,670 CB vert + 150
Trèfle violet	Fourrage vert		MM vert	MAT vert	CB vert
	Ensilage	direct	MM ens = 1,07 MM vert + 1,50 MSv – 37,4	MAT ens = 0,51 MAT vert + 0,864 MSv + 67,1	CB ens = 0,83 CB vert + 1,96 MSv + 92,2
		Préfané	--	--	--
		mi-fané	MM ens = 0,888 MM vert + 4,1	MAT ens = 0,874 MAT vert + 10	CB ens = 0,651 CB vert + 140
	Foin		MM foin = MM vert - 3	MAT foin = MAT vert - 13	CB foin = CB vert + 48
Maïs fourrager	Fourrage vert		MM vert	MAT vert	CB vert
	Ensilage		MM ens = MM vert	MAT ens = 0,98 MAT vert	CB ens = 1,05 CB vert

Tableau XIII.10. Autres équations de prédiction

Conversion de la DCS de maïs fourrager ensilage à maïs fourrager vert
DCS vert = 34,1594 + (0,58 DCS ens_{cor}) + (0,0409 MAT ens_{cor}) – (0,0276 CB ens_{cor}) – (0,0623 MS ens_{cor})
Calcul de la proportion de graminées et de légumineuses dans un fourrage composé comme la vesce-avoine par exemple.
% légumineuses = 0,6054 MAT vert - 31,534 % graminées = 100 % - % légumineuses

QUATRIEME PARTIE

L'APPLICATION DES EQUATIONS DE PREDICTION AU CALCUL DE LA VALEUR ALIMENTAIRE D'UN FOURRAGE

CHAPITRE XIV : Calcul de la valeur alimentaire du foin et du fourrage vert à partir des données de leur composition chimique et des équations de prédiction

C'est là que nous arrivons enfin à la valeur alimentaire du foin de prairie permanente de montagne de aami Lakhdar. Effectivement, l'analyse fourragère qui lui a été communiquée ne lui fournit pas directement la valeur alimentaire car ce qui l'intéressait c'est :

- la valeur énergétique exprimée en UFL,
- la valeur protéique exprimée en PDIMN et PDIME,
- la valeur d'encombrement exprimée en UEL.

Sur ce point aami Lakhdar a raison. Par contre là où il a tort, elle n'est pas une blague. Elle est un outil précieux qui fournit les données essentielles de la composition chimique du fourrage pour calculer sa valeur alimentaire. C'est là qu'interviennent les équations de prédiction telles que présentées au chapitre précédent.

1. Calcul de la valeur alimentaire du «foin de aami Lakhdar»

Pour calculer la valeur alimentaire d'un foin à l'aide des équations de prédiction, il est important de disposer non seulement de son analyse chimique, mais aussi de quelques informations sur sa nature et ses conditions de récolte et de conservation.

Selon les informations dont nous disposons, rapportées par «l'histoire de aami Lakhdar», il s'agit d'un foin de prairie permanente de montagne. Mais il n'est pas précisé combien de coupes ont été effectuées. On supposera qu'il n'y en a eu qu'une seule. C'est donc un foin de 1er cycle séché au champ. Avec ça et l'analyse[92], nous avons toute l'information nécessaire pour utiliser aussi adéquatement que possible les équations de prédiction pour calculer sa valeur alimentaire.

	%		g/kg MS				
Type de fourrage	MS	DCS	MM	MAT	CB	Ca_{abs}	P_{abs}
Foin de prairie de montagne	86	55	80	75	350	1,4	1,2

1.1. Valeur énergétique

1.1.1. : Rappel

$$\textbf{Valeur énergétique d'un fourrage (UFL)} = \frac{\textbf{ENL kcal}}{\textbf{1700 kcal}}$$

Avec

$$\mathbf{ENL = EB \times dE \times EM/ED \times k_l}$$

Et

$\mathbf{k_l = 0{,}24\ q + 0{,}4632}$	avec	$\mathbf{q = \frac{EM}{EB}}$
		et
		EM = EB x dE x EM/ED

EB (énergie brute), dE (digestibilité de l'énergie), EM/ED (efficacité d'utilisation de l'énergie digestible) et k_l sont des inconnues. Il faut donc les calculer en utilisant l'analyse chimique et les équations de prédiction.

[92] A défaut de disposer d'une analyse d'un fourrage de prairie de montagne dans le contexte de l'Algérie ou du Maghreb, les données utilisées dans cet exemple sont empruntés à une publication française relative à un foin de prairie naturelle (*Recueil des équations de calcul de la valeur nutritive des aliments pour ruminants. Groupe alimentaire des Pays de la Loire (Edition décembre 2014)*. On supposera, pour la démonstration du calcul, qu'il est plus ou moins proche de celui des prairies naturelles qui subsistent dans nos régions montagneuses. Le but étant de, seulement, montrer la démarche de calcul, un résultat plus représentatif serait à établir à partir de données locales.

1.1.2. Calcul de l'énergie brute (EB)

Pour calculer l'énergie brute (EB) il faut d'abord calculer EB_O. On cherchera dans le tableau XIII.1 l'équation de prédiction qui correspond aux caractéristiques de notre fourrage soit un foin de prairie permanente de montagne. L'équation qui correspond est :

$$\mathbf{EB_O = 4613 + 1{,}735\ MAT_O}$$

Rappelez-vous, l'énergie brute ici, est exprimée en kcal/kg de MO et non en kcal/kg de MS. Par conséquent il faut convertir la MAT fournie par l'analyse chimique en g/kg MS en MATo exprimée en g/kg MO. Pour cela, il faut diviser la teneur en MAT par kmo :

$\text{kmo} = \frac{1000 - \text{MM}}{1000} = \frac{1000 - 80}{1000} = 0{,}920$	et	$\text{MATo} = \frac{\text{MAT}}{\text{kmo}} = \frac{75}{0{,}920} = 81{,}5$ / kg de MO

Donc :

$$EB_O = 4613 + 1{,}735\ \text{MATo} = 4613 + (1{,}735 \text{ x } 81{,}5) = 4754 \text{ kcal/kg de MO}$$

Et

$$EB = \text{EBo x kmo} = 4754 \text{ x } 0{,}920 = \mathbf{4374\ \ kcal/kg\ de\ MS}$$

1.1.3. Calcul de la digestibilité de l'énergie dE

Dans le tableau XIII.1, l'équation de prédiction de la digestibité de l'énergie d'un foin de prairie permanente de montagne est :

$$\mathbf{dE = 0{,}985\ dMO - 2{,}556}$$

Dans cette équation, dMO (digestibilité de la matière organique) est inconnue. Nous devons alors la calculer par une équation choisie dans le tableau XIII.2. Comme notre analyse fourragère fournit la digestibilité cellulase de la matière sèche (DcellMS), on choisira une équation de prédiction de la dMO en fonction de cette donnée.

$$dMO = 0{,}626\ DcellMS + 26{,}8 = (0{,}626 \text{ x } 55) + 26{,}8 = \mathbf{61{,}2\%}$$

Il devient maintenant possible de calculer dE à partir de l'équation mentionnée ci-dessus.

$$dE = 0{,}985\ dMO - 2{,}556 = (0{,}985 \text{ x } 61{,}2) - 2{,}556 = \mathbf{57{,}8\%\ ou\ 0{,}578}$$

1.1.4. Calcul du rapport EM/ED

L'équation qui permet de calculer le rapport EM/ED à partir de l'analyse chimique du fourrage figure au tableau XIII.3. Elle s'écrit :

$$\frac{\mathbf{EM}}{\boldsymbol{ED}} = \frac{\mathbf{84{,}17 - 0{,}0099\ CBo - 0{,}0196\ MATo + 2{,}21\ NA}}{\mathbf{100}}$$

Avec

- NA= niveau alimentaire = 1,35, puisqu'il s'agit d'un foin
- CBo et MATo sont les teneurs en cellulose brute et en matière azotée totale exprimées en g/kg de MO. Il faut donc convertir les données fournies par l'analyse fourragère en les divisant comme précédemment par kmo = 0,920

$$\text{CBo} = \frac{\text{CB}}{kmo} = \frac{350}{0{,}920} = 380{,}4 \qquad \text{et} \qquad \text{MATo} = \frac{MAT}{kmo} = \frac{75}{0{,}920} = 81{,}5$$

Le tout exprimé en g/kg de MO.

Il est maintenant simple de calculer EM/ED, soit :

$$\frac{\text{EM}}{ED} = \frac{84{,}17 - (0{,}0099 \text{ x } 380{,}4) - (0{,}0196 \text{ x } 81{,}5) + (2{,}21 \text{ x } 1{,}35)}{100} = \frac{81{,}79}{100} = \mathbf{0{,}8179}$$

Calcul de k_l

Le calcul de k_l est basé sur l'équation :

$$\mathbf{k_l = 0{,}24\ q + 0{,}4632} \qquad \text{avec} \qquad q = \frac{EM}{EB}$$

La variable q dépend de la valeur de l'énergie métabolisable (EM) et de l'énergie brute (EB). Nous connaissons par calcul que EB = 4374 kcal/kg de MS et nous savons que :

EM = EB x dE x EM/ED = 4374 x 0,578 x 0,8179 = **2067 kcal/kg de MS**

Donc :

$$q = \frac{\mathrm{EM}}{EB} = \frac{2067}{4374} = \mathbf{0,472}$$

Il est maintenant simple de calculer k_l

k_l = 0,24 q + 0,4632 = (0,24 x 0,472) + 0,4632 = **0,576**

1.1.5. Calcul de l'énergie nette de lactation (ENL) et de la valeur énergétique du foin exprimée en UFL

Il suffit maintenant d'appliquer les valeurs calculées précédemment pour déterminer l'énergie nette de lactation (ENL) et la valeur énergétique du foin exprimée en UFL.

ENL = EB x dE x EM/ED x k_l = 4374 x 0,578 x 0,8179 x 0,576 = **1191 kcal/kg de MS**

$$\boxed{\mathbf{UFL\ /\ kg\ de\ MS} = \frac{\mathbf{1191}}{\mathbf{1700}} = \mathbf{0,70}}$$

1.2. Valeur azotée

1.2.1. Rappel

$$\mathbf{PDIN = PDIA + PDIM_N} \quad \text{et} \quad \mathbf{PDIE = PDIA + PDIM_E}$$

Avec :

$$\mathbf{PDIA = 1{,}11 \times MAT\ (1\text{-}DT) \times dr}$$

$$\mathbf{PDIM_N = 0{,}64 \times MAT\ (DT - 0{,}10)}$$

$$\mathbf{PDIM_E = 0{,}093 \times MOF}$$

La MAT est fournie par l'analyse chimique tandis que DT, dr et MOF sont des inconnues qu'il faut déterminer à l'aide des équations des tableaux XIII.4 et XIII.5 et les données du tableau XIII.7.

1.2.2. Calcul de la dégradabilté théorique (DT)

On utilise l'équation du tableau XIII.4 pour foin de prairie permanente de montagne « 1er cycle », puisque c'est ainsi qu'on a considéré notre foin. L'équation est donc :

$$\mathbf{DT\% = 52{,}7 + 0{,}12\ MAT - 0{,}00018\ MAT^2} = 52{,}7 + (0{,}12 \times 75) - (0{,}00018 \times 5625) = \mathbf{60{,}7\%\ ou\ 0{,}607}$$

1.2.3. Calcul de la digestibilté réelle (dr)

L'équation du calcul de la digestibilté réelle (dr) figure au tableau XIII.5. Elle est commune à tous les types de fourrages à quelques variations près exprimées par Δ.

dr = 100 x [MAND - PANDI]/MAND = 100 x (32,71- 7,84)/32,71 = **76% ou 0,76**	avec	MAND = 1,11 x MAT (1 - DT) = 1,11 x 75 (1 – 0,607) = **32,71**
		PANDI = 7,9 + 0,08 MAT - 0,00033 MAT^2 + Δ_1 + Δ_2 + Δ_3 = 7,9 + (0,08 x 75) – (0,00033 x 5625) – 1,9 – 2,3 = **7,84**
		$\Delta 1$ = -1,9 pour prairie 1er cycle
		$\Delta 2$ = -2,3 pour prairie permanente
		$\Delta 3$ = 0 pour fourrage conservé (foin)

1.2.4. Calcul de la matière organique fermentescible (MOF)

La matière organique fermentescible se calcule comme suit :

MOF = MOD – (PF + MG + MANDS) = 563 – (0 + 12 + 29,7) = **522 g/kg MS**	avec	MOD = MO x dMO = 920 x 61,2% = **563 g/kg MS**
		MANDS = MAT (1-DT) = 75 (1-0,607) = **29,47 g/kg MS**
		PF = 0
		MG = 12

- **MOD** = matière organique digestible. Elle se calcule en multipliant la teneur en MO par la digestibilité de la matière organique dMO, calculée précédemment tel que : MOD = MO x dMO. La teneur en matière organique (MO) n'est parfois pas fournie directement par l'analyse fourragère. Il faut donc la calculer en soustrayant la teneur en matière minérale (MM) de 1000, soit, dans ce cas-ci : MO = 1000 – MM = 1000 – 80 = 920 g/kg MS ;
- **MANDS** = matières azotées non dégradées en sachets ;
- **PF** représente les produits de fermentation et ne s'applique qu'aux fourrages conservés en ensilage ;
- **MG** = teneur en matière grasse.

Pour les déterminer, sélectionnez dans le tableau XIII.7.1, le type de fourrage correspondant à celui pour lequel sont effectués les calculs et notez la valeur correspondante. Dans notre cas c'est un foin de prairie permanente de montagne pour lequel PF = 0 et MG = 12.

1.2.5. Calcul des PDIA, $PDIM_N$ et $PDIM_E$

Maintenant nous avons tous les éléments pour calculer PDIA, $PDIM_N$ et $PDIM_E$

PDIA = 1,11 x MAT (1 – DT) x dr	PDIA = 1,11 x 75 (1 – 0,607) x 0,76	**= 24,9**
$PDIM_N$ = 0,64 x MAT (DT – 0,10)	$PDIM_N$ = 0,64 x 75 (0,607 – 0,10)	**= 24,3**
$PDIM_E$ = 0,093 x MOF	$PDIM_E$ = 0,093 x 522	**= 48,5**

Les deux valeurs azotées PDIN et PDIE de notre foin sont :

PDIN = PDIA + $PDIM_N$	= 24,9+ 24,3	= 49,2	≈ **49**
PDIE = PDIA + $PDIM_E$	= 24,9 + 48,5	= 73,4	≈ **73**

1.3. Valeur d'encombrement

La valeur d'encombrement d'un fourrage (VEF), mesurée en UEL/kg MS (unité d'encombrement lait) se calcule par la formule VEF = 140/QIL présentée au chapitre VIII et rappelée en commentaire du tableau XIII.8. QIL représente l'ingestibilié du foin pour la vache laitière, qu'il faut calculer à l'aide de l'équation de prédiction choisie dans le tableau XIII.8 pour foin de prairie permanente de montagne.

QIL = 82,4 + 0,491 dMO + 0,114 MAT = 82,4 + (0,491 x 61,2) + (0,114 x 75) = **121**	et	**VEF = 140/QIL** (UEL/kg MS) = 140/ 121 = **1,15 UEL/kg MS**

VEF = 1,15 UEL/kg MS

1.4. Récapitulation

Et voilà, aami Lakhdar est maintenant content. Il connait enfin la valeur alimentaire de son foin et la connaissance de son fourrage est maintenant complète avec :

- l'analyse chimique issue du laboratoire

	%		g/kg MS				
Type de fourrage	MS	DCS	MM	MAT	CB	Ca_{abs}	P_{abs}
Foin	86	55	80	75	350	1,4	1,2

- les données complémentaires à l'analyse chimique calculées pour permettre l'usage adéquat des équations de prédiction

	kmo	**MO**	**MATo**	**CBo**
Unité de mesure	sans unité	g/kg MS	g/kg MO	
Formule de calcul	(1000-MM)/1000	MO = 1000 – MM	MAT/kmo	CB/kmo
Valeur calculée	0,92	920	81,5	380,4

- et la **valeur alimentaire**

Type de fourrage	**%MS**	**/kg MS**		**g/kg MS**			
		UEL	UFL	PDIN	PDIE	Ca_{abs}	P_{abs}
Foin de prairie de montagne	86	1,15	0,70	49	73	1,4	1,2

Mais aami Lakhdar n'est pas au bout de ses peines ni de ses soucis car il ne sait toujours pas si ce bon foin suffira à combler l'appétit de ses braves vaches, si non, quelle quantité de concentré doit-il rajouter encore à leur ration quotidienne pour satisfaire leur bonheur et celui de sa bourse. C'est ce à quoi nous nous attellerons dans le chapitre consacré au calcul de la ration alimentaire pour vache laitière. Mais avant d'aborder celui-ci, nous traitons encore quelques autres cas de calcul de valeur alimentaire susceptibles d'être rencontrés en Algérie compte tenu des pratiques fourragères actuelles ou en émergence. De plus pour certains fourrages le calcul est un peu plus complexe que celui que nous venons de voir pour le foin. Il est donc intéressant de les passer en revue pour éviter certains petits pièges de calcul si vous êtes confronté à ces cas.

2. Calcul de la valeur alimentaire d'un fourrage vert naturel composé de graminées poussant à l'état spontané dans la Mitidja

Les données d'analyse de cet exemple sont extraites d'une étude publiée par M. BENCHERCHALI et M. HOUMANI sous le titre «Valorisation d'un fourrage de graminées spontanées dans l'alimentation des ruminants» dans la revue *Agrobiologia*. Il s'agit d'une végétation que nous pouvons assimiler à une jachère fauchée ou pâturée composée de quelques huit graminées poussant à l'état spontané dans la Mitidja. Des échantillons de cette végétation ont été prélevés et analysés à quatre stades phrénologiques différents propres aux graminées : début épiaison, épiaison, floraison, et stade grain laiteux-pâteux. Nous avons

choisi les données de l'analyse chimique du stade épiaison pour calculer la valeur alimentaire de ce fourrage.

Il n'y a pas d'équations de prédiction fournies au chapitre XIII correspondant à «jachère fauchée ou pâturée». Toutefois on peut assimiler cette dernière à une prairie temporaire bien que de courte durée, et lui appliquer les équations correspondant à fourrage vert de cette catégorie. Comme il s'agit d'une végétation naturelle de type méditerranéen qui ne persiste pas au-delà du printemps à cause de la sécheresse estivale sauf dans les zones plus ou moins marécageuses, on considérera qu'elle ne présente qu'un seul cycle de production par an ne permettant qu'une seule coupe. On prendra, dans les cas où un choix est nécessaire, les équations correspondantes à «1er cycle» au lieu de «autre cycle» puisqu'il s'agit d'un seul et unique cycle, à moins d'une irrigation, ce qui n'est pas habituel.

Figure XIV.1 : Fourrage naturel spontané sur les piedmonts de l'Atlas blidéen (en haut) et dans la plaine de la Mitidja (en bas)

2.1. Composition floristique et données brutes d'analyse

- Les données de l'analyse chimique (les données du calcium et du phosphore sont manquantes)

	%		g/kg MS				
Type de fourrage	MS	DCS	MM	MAT	CB	Ca_{abs}	P_{abs}
Fourrage vert naturel de la Mitidja	26	65	84	88	332	--	--

- Les données complémentaires calculées

Type de fourrage	**sans unité**	**(g/kg MS)**	**(g/kg MO)**	
Fourrage vert graminées	**kmo**	**MO**	**MATo**	**CBo**
	(1000-MM)/1000	MO = 1000 – MM	MAT/kmo	CB/kmo
	0,916	916	96,1	362,4

- La composition floristique

Avena sterilis (Folle avoine) 13,6 %		*Hordeum murinum* (Orge des rats) 9,0%	
Bromus madritensis (Brome de Madrid) 20,3%		*Lolium multiflorum* Ray grass d'Italie 28,2%	
Bromus mollis (Brome mou) 8,3%		*Orysopsis miliacea* (Faux millet) 6,7%	
Bromus rigidus (Brome rigide) 12,7%		*Vulpia sicula* (Queue de chacal) 1,2%	

Figure XIV.2 : Illustration de la composition botanique du fourrage naturel spontané de la Mitidja

2.2. Valeur énergétique

2.2.1. <u>Rappel</u>

La valeur énergétique d'un fourrage, exprimée en unité fourragère lait (UFL), est égale à son énergie nette de lactation (ENL) rapportée à l'énergie nette de l'orge de référence qui est fixée à 1700 kcal. Soit :

ENL = EB x **dE** x **EM/ED** x $\mathbf{k_l}$
Valeur énergétique d'un fourrage (UFL) $= \dfrac{\textbf{ENL kcal}}{\textbf{1700 kcal}}$

2.2.2. Calcul de l'énergie brute (EB) et de l'énergie digestible dE

Comme évoqué dans le cas précédent, pour calculer l'énergie brute (EB) il faut d'abord calculer EB_O. On cherchera dans le tableau XIII.1, l'équation de prédiction qui correspond aux caractéristiques de notre fourrage soit un fourrage vert de graminées. On choisira donc celle correspondant à prairie temporaire à dominance graminées. C'est ce qui se rapproche le plus de notre fourrage. Il en sera de même pour les autres calculs.

EBo = 4460 + 1,735 MAT_O	EBo = 4460 + (1,735 x 96,10) = **4627** kcal/kg de MO
EB = EBo x kmo	EB = 4627 x 0,916 = **4238** kcal/kg de MS
dMO = 0,630 DcellMS + 29,7	dMO = (0,630 x 65) + 29,7 = **70,65%**
dE = 0,957 dMO - 0,068	dE = (0,957 x 70,65) – 0,068 = **67,54% ou 0,675**

2.2.3. Calcul du rapport EM/ED

$\frac{\mathbf{EM}}{\mathbf{ED}} = \frac{\mathbf{84,17 - 0,0099\ CBo - 0,0196\ MATo + 2,21\ NA}}{\mathbf{100}}$
$\frac{EM}{ED} = \frac{84,17 - (0,0099 \times 362,40) - (0,0196 \times 96,10) + (2,21 \times 1,70)}{100}$
$\frac{EM}{ED} = \mathbf{0,825}$

2.2.4. Calcul de k_l

Équations	Calculs
EM = EB x dE x EM/ED	EM vert = 4238 x 0,675 x 0,825 = 2360 kcal/ kg de MS
$\mathbf{q = \frac{EM}{EB}}$	$q = \frac{2360}{4238} = 0,557$
$\mathbf{k_l = 0,24\ q + 0,4632}$	k_l = (0,24 x 0,557) + 0,4632 = 0,597

2.2.5. Calcul de la valeur énergétique exprimée en UFL

$$\mathbf{ENL = EB \times dE \times EM/ED \times k_l}$$

= 4238 x 0,675 x 0,825 x 0,597 = **1409 kcal/kg de MS**

La valeur énergétique exprimée en UFL, de ce fourrage vert de graminées est :

$$\mathbf{UFL/kg\ de\ MS = \frac{1409}{1700} = 0,83}$$

2.3. Valeur azotée

2.3.1. Rappel

$$\mathbf{PDIN = PDIA + PDIM_N} \quad \text{et} \quad \mathbf{PDIE = PDIA + PDIM_E}$$

Avec :

$$\mathbf{PDIA = 1,11 \times MAT\ (1\text{-}DT) \times dr}$$

$$\mathbf{PDIM_N = 0,64 \times MAT\ (DT - 0,10)}$$

$$\mathbf{PDIM_E = 0,093 \times MOF}$$

La MAT est fournie par l'analyse chimique tandis que DT, dr et MOF sont des inconnues qu'il faut déterminer à l'aide des équations des tableaux XIII.4 et XIII.5 et les données du tableau XIII.7.

2.3.2. Calcul de la dégradabilté théorique (DT)

A la ligne prairie temporaire à dominance graminées du tableau XIII.4, il y a deux équations de prédiction, la première correspond à fourrage vert «1er cycle» et la seconde à «autre cycle». Comme expliqué précédemment, on prendra l'équation pour fourrage vert «1er cycle».

DT = 60 + 0,14 MAT - 0,00017MAT^2	**=** 55,8 + (0,14 x 88) – (0,00017 x 88^2) = **71,0 ou 0,710**

2.3.3. Calcul de la digestibilté réelle (dr)

L'équation de calcul de la digestibilté réelle (dr) figure au tableau XIII.5. Elle est commune à tous les types de fourrages à quelques variations près exprimées par Δ.

dr = 100 x [MAND - PANDI]/MAND = 100 x (28,33 - 6,18) / 28,33 = **78,2% ou 0,782**	avec	MAND = 1,11 x MAT (1 - DT) = 1,11 x 88 (1 – 0,710) = **28,33**
		PANDI = 7,9 + 0,08 MAT - 0,00033 MAT^2 + Δ_1 + Δ_2 + Δ_3 = 7,9 + (0,08 x 88) – (0,00033 x 7744) – 1,9 – 2,3 – 2 = **6,18**
		Δ1 = -1,9 pour 1er cycle
		Δ2 = -2,3 pour graminées
		Δ3 = -2,0 pour fourrage vert

2.3.4. Calcul de la matière organique fermentescible (MOF)

MOF est une inconnue qu'il va falloir calculer, comme dans l'exemple précédent, par la formule :

MOF = MOD – (PF + MG + MANDS) = 647 – (25 + 25,52) = **596 g/kg MS**	avec	MOD = MO x dMO = 916 x 70,65 % = **647 g/kg MS**
		MANDS = MAT (1-DT) = 88 x (1-0,710) = **25,52 g/kg MS**
		PF = 00
		MG = 25

Maintenant nous avons tous les éléments pour calculer PDIA, $PDIM_N$ et $PDIM_E$.

PDIA = 1,11 x MAT (1 – DT) x dr	PDIA = 1,11 x 88 (1 – 0,71) x 0,782	**= 22,2**
$PDIM_N$ = 0,64 x MAT (DT – 0,10)	$PDIM_N$ = 0,64 x 88 (0,71 – 0,10)	**= 34,3**
$PDIM_E$ = 0,093 x MOF	$PDIM_E$ = 0,093 x 596	**= 55,4**

Les deux valeurs azotées PDIN et PDIE de notre fourrage sont :

PDIN = PDIA + $PDIM_N$	= 22,2+ 34,3	= 56,5	≈ **56**
PDIE = PDIA + $PDIM_E$	= 22,2+ 55,4	= 77,6	≈ **78**

2.4. Valeur d'encombrement

La valeur d'encombrement (VEF), mesurée en UEL/kg MS (unité d'encombrement lait) se calcule, comme dans l'exemple précédent par la formule :

VEF = 140/QIL (UEL/kg MS)

où QIL représente l'ingestibilié du fourrage, qu'il faut calculer à l'aide de l'équation de prédiction choisie

dans le tableau XIII.8 qui est, pour fourrage vert à dominance de graminées :

QIL = 62,6 + 0,655 dMO + 0,098 MAT + 0,626 MS

VEF = 140 / QIL (UEL/kg MS) = 140/ 133,78 = **1,05 UEL/kg MS**	avec	**QIL = 62,6 + 0,655 dMO + 0,098 MAT + 0,626 MS** = 62,6 + (0,655 x 70,65) + (0,098 x 88) + (0,626 x 26) = **133,78**

2.5. Récapitulation

Valeur alimentaire du fourrage vert naturel de graminées poussant à l'état spontané dans la Mitidja.

Type de fourrage	% MS	/kg MS		g/kg MS			
		UEL	UFL	PDIN	PDIE	Ca_{abs}	P_{abs}
Fourrage vert naturel Mitidja	26	1,05	0,83	56	78	--	--

A titre comparatif avec un fourrage vert cultivé à base de ray grass anglais de 1er cycle qui dose (UEL = 0,93, UFL = 1,02, PDIN = 143, PDIE = 103), notre fourrage de jachère paraît assez pauvre au point de vue nutritionnel. Mais comme dit le proverbe « à défaut de grives, on se contentera de merles». Nos vaches seraient bien contentes de ce fourrage vert et on leur trouvera bien un peu de concentré pour complémenter. Ce que nous verrons au chapitre relatif au rationnement de la vache laitière.

3. Calcul de la valeur alimentaire d'un fourrage de vesce-avoine récolté en vert au stade épiaison

Bien qu'il occupe une place prépondérante dans le paysage agricole algérien, ce fourrage est paradoxalement assez mal connu. On trouve peu d'analyses fourragères le concernant, facilement accessibles au grand public. Et lorsqu'on les trouve elles sont souvent anciennes, parfois incomplètes ou disséminées dans quelques travaux d'étudiants. Sur le site de l'ITELV (Institut technique des élevages) par exemple on les trouve dans un document téléchargeable sur les valeurs alimentaires des fourrages cultivés en Algérie de F. KERBAA[93] qui date de 1980, encore utilisées à ce jour dans les mémoires et thèses des étudiants en fin de cycle. Mais bien qu'anciennes, ces données sur la vesce-avoine en vert ont le mérite d'être assez détaillées. Elles présentent des analyses à différents stades de développement de la culture sans toutefois être complètes, la digestibilité cellulase de la matière sèche (DCS) faisant défaut. Elles restent toutefois valables et suffisantes pour appliquer les équations de prédiction au calcul de la valeur alimentaire de ce fourrage.

Tableau XIV.1. Analyse fourragère de la vesce-avoine en vert à différents stades de coupe (F. KERBAA)

Vesce-avoine en vert	%		g/kg MS				
	MS	DCS	MM	MAT	CB	Ca_{abs}	P_{abs}
Avoine feuillue, vesce végétative	13,1	--	127	168	205	--	2,5
Avoine montaison, vesce végétative	14,1	--	134	131	282	4,4	2,4
Avoine épiaison, vesce début floraison	16,6	--	116	124	315	5,6	1,6
Avoine floraison, vesce floraison	19,6	--	105	102	332	4,7	2,0
Avoine formation grain, vesce formation des gousses	25,5	--	117	85	357	3,6	0,7
Avoine grains laiteux, vesce gousses laiteuses	30,1	--	95	96	324	2,7	1,7
Avoine grains pâte dure, vesce gousses pâteuses	35,6	--	89	129	297	4,5	1,9

Dans l'exemple qui suit, nous calculons la valeur alimentaire de la vesce-avoine en vert coupée au stade avoine épiaison et vesce en début floraison dont les données sont extraites du tableau ci-dessus.

[93] KERBAA, F., 1980, - Guide de la valeur alimentaire des fourrages cultivés en Algérie. Institut de Développement de l'élevage bovin. Ministère de l'agriculture et de la révolution agraire.

3.1. La vesce-avoine est un fourrage composé

La particularité de cet exemple réside dans le fait que la vesce-avoine est un fourrage composé. Il est formé par deux espèces appartenant chacune à une famille botanique distincte : une graminée (l'avoine) et une légumineuse (la vesce) dont les valeurs alimentaires se calculent par des équations de prédiction propres à chacune des deux familles. Ce n'est pas comme dans les deux exemples précédents : prairie de montagne sans distinction des familles botaniques dans le premier cas et prairie temporaire à 100% de graminées dans le second. Ici on doit déterminer le pourcentage de graminées (avoine) et de légumineuses (vesce) et appliquer les équations de prédiction au prorata de la contribution de chaque famille dans le mélange. On estime la contribution de chacune des deux espèces en calculant la proportion des légumineuses dans le mélange avec la teneur en MAT fournie par l'analyse du fourrage vert et les formules du tableau XIII.10. On utilise dans les calculs qui suivent les abréviations «gram» et «leg» pour distinguer les équations applicables dans chacun des cas, graminée (avoine) et légumineuse (vesce).

% légumineuses = 0,6054 MAT vert - 31,534
et
% graminées = 100% - % légumineuses

Cette estimation a toutefois une limite et ne s'applique pas si la teneur en MAT est inférieure 75 g/kg MS. Dans ce cas, on considère le % des graminées = 100 % et on effectue les calculs comme si on avait un fourrage de graminées.

Figure XIV.3 : A gauche l'avoine au stade épiaison et à droite la vesce au stade début floraison

3.2. Données d'analyse et calculs complémentaires

	%		g/kg MS				
Type de fourrage	MS	DCS	MM	MAT	CB	Ca_{abs}	P_{abs}
Vesce-avoine en vert (Av. épiaison, vesce floraison)	16,6	--	116	124	315	5,6	1,6

Calcul de la proportion de légumineuses et de graminées dans le mélange avec

% légumineuses = 0,6054 MAT vert - 31,534

% légumineuses = (0,6054 x 124) - 31,534	= **43,5 %**
% graminées = 100 % - 43,5%	= **56,5 %**

Données complémentaires calculées

Type de fourrage	kmo	**(g/kg MS)**	**(g/kg MO)**	
		MO	MATo	CBo
Vesce-avoine	(1000 -MM)/1000	MO = 1000 – MM	MAT/kmo	CB/kmo
	0,884	**884**	**140,3**	**356,3**

3.3. Valeur énergétique

UFL = ENL kcal/1700 kcal
ENL = EB x dE x EM / ED x k_l

Energie brute (EB) et énergie digestible dE (tableau XIII.1)

Il faut calculer au prorata des deux familles botaniques qui composent le mélange et qui disposent d'équations de prédiction distinctes. Ici, pour calculer la teneur de l'énergie brute (EBo) on a deux équations dans le tableau XIII.1, l'une à la ligne « céréale immature » (EBo = 4520 + 1,735 MATo) qu'on attribue à l'avoine (et qu'on note « EBo gram » pour graminée) et la seconde à la ligne « prairie temporaire, dominance légumineuse » ou à la ligne « luzerne » (EBo = 4613 + 1,735 MATo) qu'on attribue à la vesce (notée «EBo leg» pour légumineuse).

L'énergie brute du mélange (EBo) est obtenue en faisant la somme du résultat des deux équations, pondérées par la contribution en % de l'avoine et de la vesce. On procèdera ainsi quel que soit le mélange et dans tous les cas où on a deux équations différentes l'une pour la ou les céréales (ici l'avoine) et l'autre pour la ou les légumineuse (ici la vesce).

Il faut (comme dans les exemples précédents) calculer d'abord l'énergie brute de la vesce-avoine verte sur base MO (EBo vert) par les équations appropriées et l'exprimer ensuite sur base MS par la formule (EB vert = EBo vert x kmo).

$$\textbf{EBo gram} = 4520 + 1{,}735\ MAT_O \quad \text{et} \quad \textbf{EBo leg} = 4613 + 1{,}735\ MAT_O$$

EBo = [(4520 + (1,735 x 140,3)) x 56,5%] + [(4613 + (1,735 x 140,3)) x 43,5%] = **4803** kcal/kg de MO
EB = EB_O x kmo = 4803 x 0,884 = **4246** kcal/kg de MS

Digestibilité de la matière organique (dMO) (1ère colonne du tableau XIII.2)

La DCS, n'étant pas fournie dans l'analyse, on utilisera dans ce cas les équations qui expriment la dMO en fonction de la teneur en cellulose brute. Pour l'avoine, à défaut d'une équation pour céréale immature comme pour le calcul de l'énergie brute, on utilise l'équation pour fourrage vert de prairie temporaire à dominance graminées et pour la vesce, l'équation correspondant à prairie temporaire à dominance légumineuses.

$$\textbf{dMO gram} = 90{,}8 - 0{,}091\ CB + 0{,}035\ MAT \quad \text{et} \quad \textbf{dMO leg} = 95{,}5 - 0{,}101\ CB$$

dMO = [(90,8 - (0,091 x 315) + (0,035 x 124)) x 56,5%] + [(95,5 - (0,101 x 315)) x 43,5%] = **65,3%**

Digestibilité de l'énergie (dE) (tableau XIII.1)

La digestibilité de l'énergie se calcule avec la même équation pour graminées et légumineuses. On n'applique donc pas de pondération.

$$\textbf{dE} = 0{,}957\ dMO - 0{,}068$$

dE = (0,957 x 65,3) – 0,068 = **62,4% ou 0,624**

Rapport EM/ED avec NA = 1,7 pour fourrage vert (tableau XIII.3)

$$\textbf{EM/ED} = (84{,}17 - 0{,}0099\ CBo - 0{,}0196\ MATo + 2{,}21\ NA)/100 \quad \text{(tableau XIII.3)}$$

EM/ED = [84,17 – (0,0099 x 356,3) – (0,0196 x 140,3) + (2,21 x 1,70)]/100 = **0,816**

Calcul de q et de k_l

EM = EB x dE x EM/ED

EM = 4246 x 0,624 x 0,816 = 2162 kcal/kg de MS

q = EM/EB

q = 2162/4246 = 0,509

k_l = 0,24 q + 0,4632

k_l = (0,24 x 0,509) + 0,4632 = **0,585**

Energie nette de lactation (ENL)

ENL = EB x dE x EM / ED x k_l

ENL = 4246 x 0,624 x 0,816 x 0,585 = **1265** kcal/kg de MS

Valeur énergétique du fourrage vert exprimée en UFL par kg de MS

UFL/kg MS = ENL/1700

UFL/kg MS = 1265/1700 = 0,74 UFL

3.4. Valeur azotée

Dégradabilté théorique (DT) (tableau XIII.4)

On calcule la DT de la vesce-avoine verte au prorata des deux espèces avec les équations de fourrage vert, respectivement de prairie temporaire à graminées pour l'avoine (DT gram) et de prairie temporaire à légumineuses pour la vesce (DT leg).

DT gram = 60 + 0,14 MAT - 0,00017 MAT^2 et DT leg = 58 + 0,14 MAT - 0,00017 MAT^2

DT = [(60 + (0,14 x 124) – (0,00017 x 124^2)) x 0,565] + [(58 + (0,14 x 124) - (0,00017 x 124^2)) x 0,435]
= 73,9% ou 0,739

Digestibilté réelle (dr) (tableau XIII.5)

dr = 100 x [MAND - PANDI]/MAND

dr = 100 x (35,96 - 7,55)/35,96 = **79,0% ou 0,790**

Avec :

MAND = 1,11 x MAT (1 - DT) = 1,11 x 124 (1 – 0,739) = **35,96**

et

PANDI = 7,9 + 0,08 MAT - 0,00033 MAT^2 + Δ_1 + Δ_2 + Δ_3
= 7,9 + (0,08 x 124) – (0,00033 x 124^2) – 1,9 – 1,3 – 2 = **7,55**

$\Delta 1$ = -1,9 pour le 1er cycle
$\Delta 2$ = calculé au prorata de l'avoine (graminée) soit -2,3 x 56,5% = -1,3
$\Delta 3$ = -2,0 pour fourrage vert

Calcul de la matière organique fermentescible (MOF)

MOF = MOD – (PF + MG + MANDS)

MOF = 577 – (0 + 30 + 32,39) = **515 g/kg MS**

Avec :

MOD = MO x dMO = 884 x 65,3% = **577 g/kg MS** MANDS = MAT (1-DT) = 124 x (1-0,739) = **32,39 g/kg MS**

Dans le tableau XIII.7.1, ligne vesce-avoine, fourrage vert PF = 00 et MG = 30

Valeurs de PDIA, $PDIM_N$ et $PDIM_E$

PDIA = 1,11 x MAT (1 – DT) x dr

PDIA = 1,11 x 124 (1 – 0,739) x 0,79 = **28**

$PDIM_N$ = 0,64 x MAT (DT – 0,10)

$PDIM_N$ = 0,64 x 124 (0,739 – 0,10) = **51**

$PDIM_E$ = 0,093 x MOF

$PDIM_E$ = 0,093 x 515 = **48**

Valeurs de PDIN, PDIE exprimées en g de protéines par kg de MS

PDIN = PDIA + $PDIM_N$ = 28 + 51 = 79
PDIE = PDIA + $PDIM_E$ = 28 + 48 = 76

3.5. **Valeur d'encombrement** (tableau XIII.8)

On calcule l'ingestibilié de la vesce-avoine verte au prorata des deux espèces avec les équations de fourrage vert, respectivement de prairie temporaire à graminées pour l'avoine (QIL gram) et de prairie temporaire à légumineuses pour la vesce (QIL leg).

QIL gram = 62,6 + 0,655 dMO + 0,098 MAT + 0,626 MS
QIL leg = 67,3 + 0,655 dMO + 0,098 MAT + 0,626 MS

= [(62,6 + (0,655 x 65,3) + (0,098 x 124) + (0,626 x 16,6)) x 0,565] + [(67,3 + (0,655 x 65,3) + (0,098 x 124) + (0,626 x 16,6)) x 0,435]
= 129,9

Valeur d'encombrement fourrager exprimée en UEL par kg/MS

VEF = 140/ QIL (UEL/kg MS)

VEF = 140/ 129,9 = 1,08 UEL/kg MS

3.6. Récapitulation

Type de fourrage	% MS	/kgMS		g/kg MS			
		UEL	UFL	PDIN	PDIE	Ca_{abs}	P_{abs}
Vesce-avoine en vert	16,6	1,08	0,74	79	76	5,6	1,6

4. Valeur alimentaire d'un fourrage de vesce-avoine récolté en foin

Pour cet exemple nous utilisons une analyse moyenne obtenue par la compilation de deux sources, la première de F. KERBAA (1980) et la seconde de M. HOUMANI (1998) publiées dans une étude[94] sur le traitement d'un foin de vesce-avoine avec de l'urée.

Tableau XIV.2. Analyse fourragère moyenne de la vesce-avoine en foin (Source : F. KERBAA et M. HOUMANI)

Vesce-avoine en foin	Auteur	Date	%		g/kg MS				
			MS	DCS	MM	MAT	CB	Ca_{abs}	P_{abs}
Gousse qualité moyenne	KERBAA	1980	88,5	--	121	61	363	2,6	1,0
Gousse qualité médiocre			89	--	83	58	416	3,6	0,6
Gousse mauvaise qualité			86	--	101	40	399	1,8	0,6
Sans précision	HOUMANI	1998	91,1	60,5	77	57	385	--	--
Analyse moyenne			88,7	60,5	96	54,0	391	2,7	0,7

Dans le cas présent, nous ne pouvons pas calculer les proportions de graminées et de légumineuses dans ce foin de vesce-avoine, car sa teneur en MAT est inférieure au seuil de 75/kg MS. La démarche de calcul au prorata des deux espèces ne n'applique pas. Nous considérerons donc ce fourrage comme un foin de graminées. La démarche de calcul est identique à celle appliquée au foin de aami Lakhdar. Toutefois ce dernier étant réalisé avec de l'herbe naturelle de prairie de montagne, nous avons calculé sa valeur alimentaire en appliquant les équations de prédiction de prairie permanente. Ici, nous appliquerons les équations pour prairies temporaires à dominance graminées auxquelles nous assimilons le fourrage de vesce-avoine. Pour alléger le texte, nous fournissons directement les résultats sans exposer l'ensemble de la démarche de calcul, celle-ci ayant été largement expliquée dans les exemples précédents. Vous pouvez, à titre d'exercice, faire le calcul par vous-mêmes.

Voici les données de l'analyse fourragère

	%		g/kg MS				
Type de fourrage	MS	DCS	MM	MAT	CB	Ca_{abs}	P_{abs}
Vesce-avoine en foin	88,7	60,5	96	54	391	2,7	0,7

La valeur alimentaire du foin de vesce-avoine comparativement à celle de la vesce-avoine coupée en vert au stade épiaison est :

Type de fourrage	% MS	/kg MS		g/kg MS			
		UEL	UFL	PDIN	PDIE	Ca_{abs}	P_{abs}
Vesce-avoine en vert	16,6	1,08	0,74	79	76	5,6	1,6
Vesce-avoine en foin	88,7	1,17	0,72	33	67	2,7	0,7

La valeur alimentaire du foin de vesce-avoine, calculée avec les données d'analyse fournies ci-dessus présente une teneur en protéines inférieure à celle du fourrage vert et une valeur d'encombrement supérieure. L'énergie assez basse, est sensiblement la même dans les deux cas. Or le but de mélanger la vesce à l'avoine est d'obtenir un fourrage riche en protéines. Ce qui n'est pas le cas avec la conservation de ce fourrage en foin. Pour pallier à ces pertes, une conservation par ensilage est plus indiquée. Elle conserve mieux la valeur nutritive.

[94] Houmani, M., 1998. - Amélioration de la valeur alimentaire du foin de vesce-avoine par le traitement à l'urée. Revue « Fourrages » n° 154, pp239-248.

CINQUIEME PARTIE

DE L'ENSILAGE A LA PLACE DU FOIN
CALCUL DE LA VALEUR ALIMENTAIRE DES ENSILAGES

CHAPITRE XV : De l'ensilage à la place du foin

En Algérie le fourrage de vesce-avoine est traditionnellement servi aux animaux sous forme de foin. Mais comme nous venons de le voir au chapitre précédent, ce mode de conservation fait perdre à la vesce-avoine une bonne partie de sa valeur alimentaire. Il fait chuter sa teneur en énergie (UFL) et en protéines (PDIN et PDIE) et augmente sa valeur d'encombrement (UEL). Il devient donc moins nutritif pour la vache qui en consommera une quantité moins importante que celle qu'elle aurait pu consommer s'il lui a été offert en vert. Plusieurs auteurs comme D. BELAID[95] et A. ABDELGUERFI[96] ont noté sur le terrain cette perte de valeur alimentaire du foin et l'attribuent à :

- la récolte tardive qui produit des tiges d'avoine lignifiées et donc peu digestibles;
- aux opérations multiples nécessaires à la production du foin (fauche, fanage et presse) qui causent beaucoup de pertes au feuillage de la vesce, riche en azote et diminue au final, la teneur en protéines du fourrage;
- aux risques de pluie pendant la période de fanage qui lessive le foin de ses éléments nutritifs et qui, en prolongeant cette période, causent également des pertes de feuillage.

Pour pallier à ces contraintes, l'ensilage constitue un mode de conservation alternatif au foin. Celui-ci permet d'effectuer la fauche sur un fourrage jeune et peu lignifié entre le stade épiaison et le stade pâteux de la céréale et évite la perte de feuillage de la vesce qui se produit lors des opérations de fanage et de pressage. Par ce mode de conservation, le fourrage obtenu garde des valeurs nutritives comparables à celle du fourrage vert initial.

Les techniques d'ensilage, sont pour des raisons historiques et climatiques tels qu'évoquées au premier chapitre peu connues et pratiquées en Algérie et comme le souligne D. BELAID «*La plupart de nos ingénieurs agronomes n'ont jamais vu ce procédé au cours de leur formation*». Toutefois, ces dernières années des initiatives dans ce domaine ont commencé à voir le jour chez des éleveurs laitiers et des producteurs de maïs fourrager dans le sud du pays avec l'usage de l'ensilage en balles rondes enrubannées. Des entreprises prestataires de services d'ensilage ont vu le jour et certains importateurs ont mis sur le marché quelques machines nécessaires à ce type de conservation du fourrage. Mais si pour le moment, l'ensilage en Algérie, est connu surtout sous la forme de la balle ronde enrubannée, il est important de savoir que celui-ci peut se réaliser sous différentes autres formes tel que l'ensilage en boudin (qui utilise aussi le plastique comme pour les balles rondes) et l'ensilage en silo.

1. Les différentes formes de conservation du fourrage ensilé

On peut classer les procédés d'ensilage en trois catégories. Les ensilages sous plastique, en silo (fig. XV.1) et à faible niveau de mécanisation (fig. XV.8 et suivantes). Il n'y a pas avantage dans un type de procédé par rapport à un autre. Ils se valent tous en termes de produit final avec des avantages et des inconvénients pour chacun, essentiellement sur les plans économiques et des rendements. L'investissement dans la machinerie et/ou l'infrastructure de stockage est quand même lourd en particulier pour les deux premières catégories, ensilage sous plastique ou en silo. Le mieux est de commencer progressivement avec des moyens plus modestes comme les ensilages à faible niveau de mécanisation décrits plus loin. Mais pour les agriculteurs capables de supporter ces niveaux d'investissement, ces coûts peuvent se justifier dans la mesure où l'ensilage augmente les teneurs en énergie et en protéines du fourrage, réduit les achats d'aliments et de concentrés à l'extérieur de la ferme et les pertes à la récolte.

1.1. Les ensilages sous plastique en balle ronde enrubannée ou en boudin

C'est surtout l'ensilage en balle ronde enrubannée[97] qui se développe actuellement en Algérie mais il existe dans cette catégorie, un autre procédé appelé ensilage en boudin. L'ensilage en balle ronde enrubannée,

[95] https://manualzz.com/doc/5166293/algerie--remplacer-le-foin-de-vesce

[96] Abdelguerfi, A., 2008 - Les productions fourragères et pastorales en Algérie. Situation et Possibilités d'Amélioration. Revue Agriculture & développement (INVA, Alger), n°6 : 14-25.

[97] L'ensilage en balle ronde enrubannée est relativement récent. Apparue en Europe dans les années 80, cette technique, plus souple que celle de la conservation en silo est de plus en plus en vogue dans le monde. Elle a été introduite en Algérie il y a quelques années avec le maïs fourrager produit dans les régions sahariennes (El Ménéa, Ghardaïa…) mais avec une machinerie lourde et coûteuse qui n'est pas à la portée des fermes modestes.

consiste à confectionner une balle ronde de fourrage bien serrée pour en évacuer l'air et l'oxygène, et l'envelopper par 5 ou 6 couches de plastique de manière à créer les conditions d'anaérobie nécessaires à la fermentation. Par cette technique, le fourrage est conservé avec les mêmes qualités que celles du fourrage vert.

L'ensilage en boudin dérive quelque peu de la balle ronde enrubannée car il utilise aussi du plastique, mais au lieu de produire plusieurs balles rondes individuelles, celui-ci se présente comme un long tube de plastique (c'est pour cela qu'on l'appelle boudin) dans lequel on tasse fortement le fourrage au fur et à mesure de son remplissage. Ces deux types d'ensilage (balle ronde enrubannée ou boudin) sont un peu coûteux, car ils nécessitent beaucoup de plastique (dont il faut se débarrasser après usage, donc polluant) et surtout de disposer de machineries appropriées dont les coûts ne sont pas à la portée de tous, a moins d'envisager une utilisation en coopérative.

Ces coûts de machineries varient toutefois selon le niveau de mécanisation et d'automatisation souhaité. On peut trouver sur le marché des machines simples pour confectionner séparément la balle ronde et l'enrubanner ensuite sur une enrubanneuse à poste fixe (fig. XV.5) jusqu'aux machines les plus sophistiquées qui réalisent simultanément toutes les opérations : de la coupe du fourrage à la confection de la balle ronde enrubannée (fig. XV.7) par un seul opérateur. Entre ces deux extrêmes, il existe des variantes avec des configurations intermédiaires (fig. XV.6).

1.2. Les ensilages en silo

Pour pallier à ces inconvénients (coût de machinerie et usage excessif du plastique), Le fourrage en silo peut présenter une alternative acceptable et plus accessible pour celles ou ceux qui n'envisagent pas sa revente. Car il est plus facile de vendre du fourrage ensilé en balle qu'en vrac. Ce procédé consiste à disposer le fourrage récolté en tas, idéalement sur une dalle bétonnée ou une surface protégée par une bâche plastique imperméable. Au fur et à mesure que le tas est constitué, on effectue plusieurs va et vient sur celui-ci avec un tracteur, si possible équipé de pneus larges, pour chasser l'air et l'oxygène qu'il contient et permettre la fermentation. Une fois le tas réalisé et bien tassé par les multiples passages du tracteur, le tout est recouvert par une bâche plastique imperméable à l'air et à l'eau bien sûr. Pour éviter que des poches d'air persistent en dessous de la bâche qui recouvre le tas, on leste celle-ci par des poids. En général, on utilise des pneus usagés ou des sacs de gravier qu'on dispose sur toute la surface de la bâche au-dessus du tas et sur les côtés. En pratique, il existe deux types de silo qui peuvent facilement être réalisés dans les conditions agricoles maghrébines et algériennes sans qu'ils ne soient trop budgétivores : le silo couloir et le silo taupinière.

1.2.1. Le silo couloir

Dans ce type de silo, le fourrage est mis en tas et compacté sur une dalle bétonnée comprise entre deux murs rigides parallèles également construits en béton, d'où le nom de silo couloir. Le fond du couloir peut être ouvert ou fermé mais de préférence, il faut le laisser ouvert pour faciliter la circulation des tracteurs qui opèrent le compactage. On peut voir un exemple de ce silo à la figure XV.1. Il s'agit là d'un grand silo, mais les dimensions peuvent être adaptées en fonction des besoins et des moyens. Toutefois, même s'il est simple dans sa forme, sa construction nécessite l'assistance d'un professionnel qui calculera le dosage du béton et du ferraillage car lors du compactage il s'opère une très forte pression sur la structure. Il faut calculer aussi une certaine pente à la plate-forme, car du liquide peut s'écouler de l'ensilage si le fourrage ne présente pas un taux de matière sèche suffisamment élevé lors de sa mise en silo. Ce ne sera pas le cas avec la vesce-avoine si elle est ensilée au stade pâteux, sa matière sèche étant comprise autour de 30 à 35%, mais le risque existe avec d'autres fourrages à base d'herbe, de luzerne ou de céréales immatures coupées à des stades plus précoces. Il faut dans ces cas prévoir même un bassin de rétention pour récupérer ces liquides qui sont acides et polluants.

1.2.2. Le silo taupinière

Le silo taupinière appelé aussi silo-meule est la solution la plus économique. Sa construction nécessite peu de matériaux si ce n'est une dalle de béton ou tout simplement une bâche épaisse au sol pour protéger le fourrage des contaminations par la terre. Bien que son étanchéité reste inférieure à celle du silo couloir et à

l'enrubannage, son avantage réside dans son coût et la simplicité de sa mise en place. Le fourrage est simplement mis en tas sur la dalle ou sur la bâche, compacté par plusieurs passages en va et vient du tracteur, recouvert hermétiquement d'une bâche plastique imperméable lestée par des pneus ou autres poids et c'est fini. Dans les deux cas, silo couloir ou taupinière, un bon compactage garanti le succès de l'ensilage.

Ensilage en balles rondes à gauche et en boudin à droite

Silo couloir. A gauche, avant remplissage. A droite après remplissage

Silo taupinière. A gauche, en préparation. A droite après remplissage

Figure XV.1 : Les différentes formes de conservation du fourrage ensilé

2. Les travaux préalables à l'ensilage selon la forme de conservation et le type de fourrage à ensiler

Les opérations de coupe et de conditionnement du fourrage avant son ensilage varient selon le type de fourrage à ensiler et impliquent une machinerie spécifique selon les cas. Il existe grosso modo trois types de fourrage propices à l'ensilage :

- l'herbe de prairies permanentes ou temporaires à laquelle on peut aussi assimiler les céréales immatures ou la végétation naturelle type Mitidja (jachère fauchée) vu au chapitre précédent,
- les fourrages composés (aussi appelés méteil par les agriculteurs européens francophones) comme la vesce-avoine ou autre mélange avec par exemple le triticale, le pois, la féverole, le sulla, etc. …,

- les plantes fourragères de grande taille comme le maïs fourrager et le sorgho.

2.1. Herbe naturelle, de prairie et fourrage assimilé

L'herbe de prairie est coupée par une faucheuse et andainée (fig. XV.2) pour être déshydratée avant l'ensilage. Celle-ci coupée en général autour de 20% de matière sèche, doit-être ramenée à un taux compris entre 30 et 35% avant ensilage si ce dernier est effectué en boudin ou dans un silo et entre 40 et 50% s'il est effectué en balles rondes enrubannées.

Figure XV.2 : Coupe d'herbe et andainage

Toutefois, il existe certaines pratiques où le fourrage est ensilé à moins de 30% de MS en particulier dans les régions pluvieuses où les aléas climatiques ne permettent pas de laisser le fourrage sécher longtemps au champ avant son ensilage. C'est la raison pour laquelle, figurent, dans plusieurs tableaux des équations de prédiction présentées au chapitre XIII, trois types d'ensilage.

- L'ensilage direct : le fourrage est ramassé pour être ensilé immédiatement après la fauche ou a séjourné au sol moins de 24 heures. Sa matière sèche est inférieure à 25%. Les risques d'écoulement de jus de l'ensilage, sont importants dans ce cas.
- L'ensilage préfané : le fourrage est ramassé pour être ensilé après un séjour au sol de plus de 24 heures après sa fauche : sa matière sèche est supérieure à 25% jusqu'à environ 35 à 40%.
- L'ensilage mi-fané : le séchage, est plus poussé jusqu'à 50 à 60% de matière sèche. C'est le cas des balles rondes enrubannées.

Si l'ensilage est envisagé en boudin ou en silo, le fourrage doit aussi préalablement être haché en brins courts pour permettre un tassement efficace et éviter la persistance de poches d'air dans le tas de fourrage qui risque de le faire pourrir. Cette opération est effectuée au moment du ramassage de l'andain par ce qu'on appelle une ensileuse avant d'être chargé sur la benne qui le transporte sur le lieu d'ensilage. Si par contre l'ensilage est effectué par balles rondes enrubannées, le fourrage n'est pas haché et il est conservé en brins longs (fig. XV.3). Son taux de MS plus élevé et le taux de compression qui lui est appliqué au moment de la confection de la balle, diminuent le risque de présence de poches d'air qui peuvent nuire à sa qualité.

2.2. Les fourrages composés : vesce-avoine et autre

Dans le cas du fourrage composé, comme la vesce-avoine (ou autres mélanges), les opérations préalables avant la conservation en ensilage dépendent du stade auquel est coupé celui-ci. Généralement pour faire un bon ensilage de vesce-avoine, on coupe soit à un stade précoce (épiaison) soit à un stade plus mature (laiteux-pâteux à pâteux). Dans le premier cas on a un rendement faible dû à une matière sèche basse (moins de 20%) mais un fourrage de qualité riche en matière azotée et peu fibreux et dans le second cas, on a un bon rendement avec une matière sèche comprise entre 35 et 40% et une valeur alimentaire moyenne, mais quand même assez riche en protéines ou en MAT, due à la présence des graines de légumineuses.

Si hachage au ramassage de l'andain | Brins courts

Ensilage en silo couloir | Ou en boudin

Si ramassage par presse à balle ronde sans hachage | Brins longs

Pressage de la balle ronde | Et enrubannage; ici en poste fixe dans le champ

Figure XV.3 : Ensilage préfané et mi-fané d'herbe hachée ou non selon mode de conservation envisagé. On économise l'opération de hachage dans le cas de l'enrubannage

Voici à quoi peut ressembler la valeur alimentaire de ce fourrage en vert selon les stades de coupe, calculée selon les méthodes exposées au chapitre précédent à partir des données sur sa composition chimique publiés sur le site web de l'ITELV.

Vesce-avoine	%	g/kg MS			Valeur alimentaire			
	MS	MM	MAT	CB	UFL	PDIN	PDIE	UEL
Avoine épiaison, vesce début floraison	16,6	116	124	315	0,74	80	77	1,08
Avoine floraison, vesce floraison	19,6	105	102	332	0,72	66	73	1,09
Avoine grains pâteux, vesce gousses pâteuses	35,6	89	129	297	0,79	83	84	0,97

Si la vesce-avoine est semée tôt dès les premières pluies au mois de septembre elle peut être, aussi, coupée tôt. Sa valeur alimentaire sera relativement bonne (plus ou moins équivalente avec celle de la coupe tardive selon les données ci-dessus) mais avec une matière sèche basse et donc un rendement faible. L'avantage dans ce cas est de libérer tôt le champ pour une autre culture (possible en semis direct) dès la fin de l'hiver. A l'inverse, une coupe tardive procure un bon rendement mais occupe plus longtemps le champ rendant aléatoire la possibilité d'une deuxième culture. La décision d'une coupe précoce ou tardive dépendra donc du choix et de la stratégie de l'agriculteur.

Dans le cas d'une coupe précoce (stade épiaison) les opérations sont similaires à ceux de l'ensilage d'herbe de prairie : coupe et andainage pour un pré-fanage à 35 - 40% de MS (ce qui prend une durée moyenne de 48 à 72 heures, soit 3 jours au maximum selon les conditions de chaleur dans nos régions) puis ramassage de l'andain avec hachage si l'ensilage est prévu en silo ou en boudin. Si l'ensilage est effectué en balles rondes enrubannées, il faut rallonger le temps de séchage jusqu'à environ 96 heures (soit 4 jours maximum) ou jusqu'à atteindre un taux de MS autour de 50%. Le fourrage dans ce cas est pressé en brins longs sans hachage.

Dans le cas d'une coupe tardive (stade laiteux pâteux ou pâteux) le taux de matière sèche est déjà autour de 35%, ce qui est suffisant pour l'ensilage et il n'est pas nécessaire d'andainer si on dispose de la machinerie nécessaire. Celui-ci est ensilé directement après la coupe. Il est haché en même temps qu'il est coupé, chargé dans une benne et acheminé vers le lieu d'ensilage où la conservation est faite indifféremment en silo, en boudin ou en balles rondes enrubannées. Les coûts de cette opération toutefois élevés vu la machinerie impliquée et les dépenses en carburant ne peuvent se justifier que par le traitement de grands volumes de fourrage. Ce qui n'est pas le cas des petites fermes, à moins qu'elles ne se regroupent en coopératives pour ce genre d'opération.

Plus économique, cet ensilage peut également être effectué en balles rondes enrubannées directement au champ par une presse tractée comme celle montrée dans les figures XV.5 et XV.6. Il n'y a pas de hachage dans ce cas, mais il faut andainer après la coupe (sans dépasser 24 heures maximum au champ pour éviter un séchage trop poussé). Il faut aussi augmenter le nombre de tours de plastique à 8 ou 10 couches pour prévenir la perforation de l'enrubannage par les tiges du fourrage devenues à ce stade assez rigides ou en déposant la balle sur les chaumes.

2.3. Les plantes fourragères de grande taille

Les plantes fourragères de grande taille (maïs fourrager, sorgho…) présentent au moment de leur récolte comme pour la vesce-avoine au stade pâteux, une matière sèche d'environ 35% qui les rend tout de suite aptes à l'ensilage. Celui-ci est toujours effectué en coupe directe avec hachage quel que soit le type de conservation en silo ou en balles rondes enrubannées. Ce qui implique une machinerie assez lourde parce que d'une part les ensileuses pour les plantes fourragères de grande taille sont équipées de tables de coupe spécifiques (fig. XV.4), d'autre part, les tiges de maïs et de sorgho étant plus grosses par rapport aux autres types de fourrage, la conservation en balles rondes enrubannées ne peut se faire en fibres longues ou plante entière comme cela est possible avec l'herbe ou les fourrages composés.

Coupe directe sans andainage d'un fourrage composé (avoine, triticale, vesce et pois). Hachage et chargement de la benne	Coupe directe d'un fourrage de grande taille (ici sorgho). Hachage et chargement de la benne
Presse enrubaneuse à poste fixe alimentée par le fourrage haché amené directement du champ	Ensilage en silo (ici silo couloir) qui peut également être en taupinière ou en boudin
Table de coupe pour fourrage composé de type vesce-avoine ou autre	Table de coupe pour fourrage de grande taille de type maïs fourrager ou sorgho

Figure XV.4 : Ensilage en coupe directe de fourrage composé (type vesce-avoine) et de maïs fourrager (MS ≈ 35 %). Le fourrage composé peut également être conservé en balles rondes enrubannées sans hachage. Dans ce cas il est nécessaire d'andainer et éventuellement mi-faner (autour de 50% de MS)

La machine ramasse le fourrage préalablement andainé et presse la balle ronde dans la chambre de compression

Après confection de la balle, celle-ci est éjectée au sol

Elle est ramassée et chargée sur l'enrubanneuse à poste fixe

L'enrubannage est amorcé manuellement

La balle est enrubannée

et éjectée au sol par inclinaison de l'enrubanneuse et en reculant un peu le tracteur.

Figure XV.5 : Ensilage de fourrage pré ou mi-fané (35 à 50% de MS) en brins longs (non haché) en deux opérations séparées : ramassage du fourrage andainé et confection de la balle ronde par une presse tractée et enrubannage sur une enrubanneuse à poste fixe

Des équipements plus automatisés existent aussi à des coûts bien sûr plus élevés, mais suffisamment abordables si on envisage une acquisition sur le marché des occasions. On voit sur la figure suivante (fig. XV.6) une presse enrobeuse tractée qui effectue simultanément trois opérations : ramassage du fourrage andainé, confection de la balle ronde et enrubannage.

Comme pour faire du foin, le fourrage est mis en andain et ramassé préfané (30 à 35%) ou mi-fané (45 à 50%).

La machine ramasse le fourrage andainé, presse la balle ronde dans la chambre de compression en haut

l'éjecte à l'arrière sur l'enrubanneuse …

et l'enrubanne

Figure XV.6 : Ensilage de fourrage pré ou mi-fané en brins longs (non haché) réalisé par une presse enrubanneuse tractée qui effectue simultanément trois opérations : ramassage du fourrage andainé, confection de la balle ronde et enrubannage

Et enfin, avec un investissement plus lourd on peut trouver encore des machineries complètement automatisées avec une seule personne pour effectuer simultanément toutes les opérations.

Figure XV.7 : Ensilage direct en balle ronde enrubannée de maïs fourrager. Cinq opérations sont effectuées simultanément : coupe, hachage, chargement de la presse, pressage de la balle et enrubannage

3. Les ensilages à faible niveau de mécanisation

On retrouve des façons de faire de l'ensilage dans certains pays africains et de l'Amérique du sud sans mécanisation ou très peu qui peuvent être très intéressantes pour les petits élevages dans nos pays.

3.1. Le silo fosse africain

Dans plusieurs pays africains, en particulier des régions tropicales humides il y a une tradition ancienne d'ensilage de l'herbe par conservation en silo fosse (fig. XV.8). Le silo fosse est une tranchée de dimension variable selon la quantité de fourrage à ensiler, creusée dans le sol. Le fourrage est coupé grossièrement à la machette en brins plus ou moins courts pour faciliter son tassage. Il est déposé en couches successives et tassé (comme pour le silo couloir ou le silo meule) jusqu'à arriver à la surface du sol. Le tassement du fourrage est effectué simplement avec les pieds ou quand les conditions matérielles le permettent avec un tracteur (fig. XV.9). Quand le remplissage est terminé, le fourrage tassé est recouvert par des feuilles de bananier pour le protéger des contaminations du sol avant qu'il ne soit enterré pour lui assurer un milieu anaérobie nécessaire à sa fermentation. Avec l'usage des toiles en plastique aujourd'hui, l'étanchéité du fourrage est assurée par une bâche qui recouvre le plancher et les parois de la fosse avec des pans débordant de chaque côté qui serviront à recouvrir le fourrage avant de refermer la fosse avec de la terre (fig. XV.9). Le silo est ouvert plusieurs mois plus tard pour alimenter les animaux à la saison sèche. Cette technique très peu consommatrice d'énergie et de machinerie peut avec quelques améliorations techniques être facilement adaptée à nos conditions dans les petites fermes et les petits élevages.

Figure XV.8 : Photo d'un chantier d'ensilage en silo fosse datant de 1930 dans une région de ce qui était appelé à l'époque «l'Afrique occidentale française». Toutes les tâches sont manuelles sauf le transport du fourrage, effectué en chariots tirés par des bœufs ou des zébus

Cette tradition perdurent à nos jours, souvent encore complètement manuelle ou quelque peu mécanisée avec l'usage d'un tracteur.

Pendant que les uns creusent la fosse …

… d'autres fauchent le fourrage …

… qui est grossièrement coupé à la machette …

… et joyeusement foulé aux pieds pour être tassé

Pour les plus riches, camion et tracteur diminuent la pénibilité du travail, la bâche plastique assure une meilleure étanchéité et les pneus usagés remplaceront la terre pour maintenir la couverture en place

Figure XV.9 : Tradition d'ensilage dans les pays africains tropicaux qui perdure à nos jours

3.2. En Amérique du sud, l'ensilage à peu de frais et beaucoup d'imagination

Dans les pays de l'Amérique latine on n'a pas d'argent, mais on a des idées !!! Les petites fermes ne peuvent pas se payer le luxe des grosses machines alors elles se payent les petites. Avec un rotocut ou des machettes, un petit broyeur, un aspirateur domestique, des sacs en plastique, et le tour est joué : l'ensilage est dans le sac.

On coupe le maïs ou le sorgho à la machette

On le transporte en plant entier

On le hache avec une petite broyeuse

On remplit le sac

On tasse vigoureusement

Certains utilisent un pressoir

D'autres plus malins, tassent sans se fatiguer en vidant l'air du sac avec un aspirateur de maison

Et on stocke pour l'hiver ou la saison sèche

Figure XV.10 : Ensilage à faible niveau de mécanisation en Amérique du sud

Certaines fermes plus outillées, utilisent un moule en métal pour monter un silo de 2 mètres de diamètre sur à peu près 1,5 mètre de hauteur qui fournit un volume appréciable d'environ 5 m^3 d'ensilage. C'est un procédé comparable au silo meule mais du fait de sa taille réduite, il est très économique et ne nécessite aucune machinerie lourde. Comme le moule métallique se démonte et se remonte facilement on peut confectionner comme ça plusieurs silos côte à côte.

On apporte les panneaux …	Pour confectionner un moule métallique tapissé d'une bâche en plastique
Pendant ce temps, le maïs fourrager voyage tranquillement en plant entier, du champ à la ferme	Il ne sait pas ce qui l'attend. Un petit broyeur qui n'a l'air de rien, le hache menu aussitôt arrivé …
... Et le déverse en petits brins dans le moule	Après arrosage par de la mélasse, urée et autre …
On tasse le fourrage haché pour en chasser l'air	Et après un fort et minutieux tassage, le silo est démoulé

Bien sanglé par un câble approprié qui évitera au plastique de se déchirer sous l'effet de la pression

Le silo va pour quelques semaines, goûter enfin au repos, bien lesté par quelques dalles de béton

Figure XV.11 : Technique d'ensilage à faible niveau de mécanisation utilisée en Amérique du sud par la confection d'un silo à l'aide d'un moule en métal.

Et enfin, pourquoi faire compliquer, quand on peut faire simple ? Avec a un peu de moyens, on ne se prend pas la tête!! Ni balles rondes ni silo, on coupe et on ensile directement comme dans les photos ci-après.

On coupe, on hache et on ensile directement dans le sac

Pas besoin de tassage

Avec la forme haute du sac et quelques secousses à son déchargement, le fourrage se tasse naturellement sous son propre poids (700 kg par sac)

Après la fermentation et au moment voulu, le sac est ouvert

Et le fourrage est servi. Point !

Figure XV.12 : Coupe, hachage et ensilage direct de maïs fourrager dans des sacs de 700 kg

La conclusion est claire. Oui l'ensilage est possible, même pour de petites fermes sans que celles-ci ne se ruinent en équipement lourd et sophistiqué. Paradoxe ou mythe, comme nous l'écrivions en avant-propos de ce livre ? Un peu des deux qu'il faut défaire par un apprentissage de nos éleveurs, par des services de vulgarisation, des conseils techniques et surtout en mettant sur le marché des produits simples comme les tissus plastiques et les petits équipements mécaniques (broyeurs, moules, pressoirs …) dont la fabrication

est tout à fait à la portée de nos entreprises. Théoriquement, l'Algérie ne manque ni d'acier ni de produits dérivés des hydrocarbures !!! Tout est possible. Il faut juste briser le carcan qui emprisonne nos cerveaux dans des représentations agronomiques qui ne reflètent pas toujours nos réalités concrètes. Il faut libérer notre enseignement des paradigmes des sciences agronomiques européennes, historiquement développées dans un contexte de climat tempéré et d'une agriculture productiviste fortement mécanisée. On vient de voir, avec les exemples africains et sud-américains, que ce n'est ni le climat ni la machine qui font l'ensilage mais la détermination du génie paysan quand celui-ci est libéré, peu importe le climat et le niveau de mécanisation. Mais Pour ce faire, une politique globale mobilisant tous les acteurs est indispensable. Elle ne se résume pas au seul secteur de l'enseignement. Elle concerne aussi le secteur de l'agriculture pour sa politique de développement (orientations, soutien, diffusion), la profession agricole (organisation des filières, coopératives,...), le financement, la recherche ...

CHAPITRE XVI : Calcul de la valeur alimentaire des fourrages ensilés à partir des données de leur composition chimique et des équations de prédiction

La valeur alimentaire d'un ensilage peut être calculée par deux approches différentes. Soit par une analyse d'un échantillon prélevé sur fourrage vert avant ensilage le jour même du chantier d'ensilage soit par une analyse d'un échantillon prélevé sur maïs fourrager déjà ensilé et fermenté. En général, c'est la première méthode qui est recommandée car l'échantillonnage direct dans les bennes de récolte ou sur l'andain en pré-fanage, est considéré plus représentatif que celui fait dans un silo ou dans une balle ronde qui risque de ne pas être représentative de l'ensemble de la récolte.

Coupe, hachage et chargement de la benne — Vidange de la benne

Convoyage vers l'enrubanneuse — Façonnage de la balle ronde

Enrubannage — Entreposage des balles rondes enrubannées

Figure XVI.4 : Chantier d'ensilage de maïs fourrager en balles rondes enrubannées dans une ferme de l'Oranie en Algérie organisé par l'entreprise de prestation de service SARL Agro plus. (Source : https://www.youtube.com/watch?v=mYoFOfxj88M)

1. Calcul de la valeur alimentaire d'un ensilage de maïs fourrager à partir d'une analyse effectuée sur fourrage vert avant ensilage

Dans ce cas (analyse d'un échantillon prélevé sur fourrage vert avant ensilage) il faut d'abord convertir les données de l'analyse fournie sur fourrage vert en valeurs pour maïs fourrager ensilage avant d'utiliser les équations de prédiction. Ces conversions sont effectuées par les formules fournies par le tableau XIII.9 à la ligne « maïs fourrager » résumées ci-après. Les nouvelles valeurs calculées seront alors utilisées dans les équations de prédiction pour maïs ensilage sauf dans celles qui prédisent l'énergie brute et la dMO. Celles-ci doivent d'abord être calculées sur fourrage vert ensuite extrapolées à l'ensilage.

MS ens = 0,865 MS vert + 5,96
MM ens = MM vert
MAT ens = 0,98 MAT vert
CB ens = 1,05 CB vert
dM0 ens = d MO vert

Cela parait compliqué, mais on va voir par l'exemple ci-après que la démarche est relativement simple. Voici un exemple d'analyse[98] sur maïs fourrager vert au stade pâteux-vitreux telle que supposée être fournie par le laboratoire.

	%		g/kg MS				
Type de fourrage	**MS vert**	**DCS vert**	**MM vert**	**MAT vert**	**CB vert**	**Ca_{abs}**	**P_{abs}**
Maïs fourrager vert	35	70	43	72	185	--	--

1.1. Conversion des données d'analyse de fourrage vert à maïs fourrager ensilage

Ces conversions permettent d'obtenir les nouvelles valeurs applicables au maïs fourrager ensilage qui seront utilisées dans les équations de prédiction. Notez bien que la DCS n'a pas besoin d'être convertie puisque cette donnée sert à prédire la dMO qui, comme l'énergie brute (EB) se calcule dans le cas du maïs fourrager, seulement sur fourrage vert extrapolée ensuite à l'ensilage.

	% / kg MS		g/kg MS		
	MS	**DCS**	**MM**	**MAT**	**CB**
Données d'analyse originales (vert)	35	70	43	72	185
Données converties (ens)	36,23	70	43	70,56	194,25

1.2. Données complémentaires calculées pour maïs fourrager vert et ensilé

	sans unité	(g/kg MS)	(g/kg MO)	
	kmo (1000 - 43) /1000	**MO** MO = 1000 – 43	**MATo**	**CBo**
Sur base vert (vert)	0,957	957	72 / 0,957	185 / 0,957
			75,24	193,31
Sur base ensilage (ens)		957	70,56 / 0,957	194,25 / 0,957
			73,73	202,98

[98] Comme dans l'exemple du foin de Aami Lakhdar (chapitre XIV), à défaut de disposer d'une analyse de maïs fourrager effectuée dans le contexte de l'Algérie ou du Maghreb, les données utilisées dans cet exemple sont empruntés à une publication française (*Recueil des équations de calcul de la valeur nutritive des aliments pour ruminants. Groupe alimentaire des Pays de la Loire. Edition décembre 2014*). Le but étant de, seulement, montrer la démarche de calcul, un résultat plus représentatif serait à établir à partir de données locales.

1.3. Valeur énergétique

1.3.1. Rappel

La valeur énergétique d'un fourrage, exprimée en unité fourragère lait (UFL), est égale à son énergie nette de lactation (ENL) rapportée à l'énergie nette de l'orge de référence qui est fixée à 1700 kcal. Soit :

$$\textbf{Valeur énergétique d'un fourrage (UFL)} = \frac{\textbf{ENL kcal}}{\textbf{1700 kcal}}$$

Avec pour le cas d'un maïs fourrager ensilage :

$$\textbf{ENL ens} = \textbf{EB ens} \times \textbf{dE ens} \times \textbf{EM ens / ED ens} \times \mathbf{k_l}$$

1.3.2. Calcul de l'énergie brute (EB) et de l'énergie digestible dE

L'équation de prédiction de l'énergie brute pour le maïs fourrager ensilage avec une MS>30%, relevée sur le tableau XIII.1 est :

$$\textbf{EBo ens} = \textbf{EBo vert} + 25$$

Il faut donc d'abord calculer l'énergie brute du maïs fourrager vert par l'équation appropriée choisie dans ce même tableau :

$$\textbf{EBo vert} = 4487 + 2{,}019\ \mathbf{MAT_O}$$

et l'extrapoler ensuite, au maïs ensilage par l'équation précédente en n'oubliant pas bien sûr, d'exprimer à la fin du calcul, l'énergie brute du maïs ensilage en g/kg MS par la formule :

$$\textbf{EB ens} = \textbf{EBo ens} \times \textbf{kmo}$$

Pour alléger le texte, les calculs sont présentés ici avec moins de commentaires, leurs explications ayant été déjà largement fournies dans les exemples précédents.

Maïs fourrager vert	Maïs fourrager ensilage
EBo vert = 4487 + 2,019 MAT_O vert = 4487 + (2,019 x 75,24) = 4639 kcal/kg de MO	**EBo ens = EBo vert + 25** (pour MS >30%) = 4639 + 25 = 4664 kcal/kg de MO
	EB ens = EBo ens x kmo EB ens = 4664 x 0,957 = **4463** kcal/kg de MS
dMO vert = 0,55 DCS + 0,0732 MATo vert + 28,5 = (0,55 x 70) + (0,0732 x 75,24) + 28,5 = 72,51%	**dMO ens = dMO vert** = 72,51%
	dE ens = 1,001 dMO ens – 2,86 dE ens = (1,001 x 72,51) – 2,86 = 69,72% ou **0,6972**

1.3.3. Calcul du rapport EM ens/ED ens

$$\frac{\textbf{EM ens}}{\textbf{ED ens}} = \frac{\mathbf{84{,}17 - 0{,}0099\ CBo\ ens - 0{,}0196\ MATo\ ens + 2{,}21\ NA}}{\mathbf{100}}$$

$$\frac{\text{EM ens}}{\text{ED ens}} = \frac{84{,}17 - (0{,}0099 \times 203{,}98) - (0{,}0196 \times 73{,}73) + (2{,}21 \times 1{,}20)}{100}$$

$$\frac{\text{EM ens}}{\text{ED ens}} = \mathbf{0{,}834}$$

Avec NA = 1,20 pour maïs fourrager vert ou ensilé (tableau XIII.3)

1.3.4. Calcul de k_l

Équations	Calculs
EM ens = EB ens x dE ens x EM ens / ED ens	EM ens = 4463 x 0,6972 x 0,834 = 2595 kcal/kg de MS
$\mathbf{q = \frac{EM\ ens}{EB\ ens}}$	$q = \frac{2595}{4463} = 0{,}581$
k_l = 0,24 q + 0,4632	k_l = (0,24 x 0,581) + 0,4632 = **0,603**

1.3.5. Calcul de l'énergie nette de lactation (ENL) et de la valeur énergétique de l'ensilage de maïs exprimée en UFL

Il suffit maintenant d'appliquer les valeurs calculées précédemment pour déterminer l'énergie nette de lactation (ENL ens) :

ENL ens = EB ens x dE ens x EM ens / ED ens x k_l

= 4463 x 0,6972 x 0,834 x 0,603

= **1564 kcal/kg de MS**

Et la valeur énergétique exprimée en UFL, de l'ensilage de maïs fourrager :

$$\mathbf{UFL\ ens\ /\ kg\ de\ MS = \frac{1564}{1700} = 0{,}92}$$

1.4. Valeur azotée

PDIN ens = PDIA ens + $PDIM_N$ ens

PDIE ens = PDIA ens + $PDIM_E$ ens

Avec :

PDIA ens = 1,11 x MAT ens (1-DT) x dr

$PDIM_N$ ens = 0,64 x MAT ens (DT – 0,10)

$PDIM_E$ ens = 0,093 x MOF ens

- MAT ens (= 70,56 g/kg MS) est fournie par les calculs effectués plus haut à partir des données de l'analyse chimique du fourrage vert.
- La dégradabilté théorique (DT) et la digestibilté réelle (dr) sont tirées directement des tableaux XIII.4 et XIII.6 à la ligne correspondant à maïs fourrager ensilage, soit :

DT = 72 % ou **0,72**	**dr = 70%** ou **0,70**

- PF (produit de fermentation), fourni par le tableau XIII.7.1. à la ligne « maïs fourrager ensilage 35% », est égal à 80 g/kg MS. Mais en réalité la MS extrapolée de notre ensilage est 36,23%. Si vous voulez être plus précis, reportez-vous au tableau XIII.7.2 ; dans ce cas PF = 76 g/kg MS pour une matière sèche de 36,23% qu'on arrondi à 36%.
- MG (matière grasse), également fournie par le tableau XIII.7.1 à la ligne « maïs fourrager ensilage », est égale à 28 g/kg MS quel que soit la valeur de la matière sèche.
- MOF est à calculer avec les valeurs des paramètres présentés ci-dessus.

MOF ens = MOD ens – (PF + MG + MANDS ens) = 694 – (76 + 28 + 19,76) = **570,24 g/kg MS**	avec	MOD ens = MO ens x dMO ens = 957 x 72,51% = 694 g/kg MS
		MANDS ens = MAT ens (1-DT) = 70,56 (1-0,720) = 19,76 g/kg MS
		PF = 76
		MG = 28

Les teneurs en PDIA ens, $PDIM_N$ ens et $PDIM_E$ ens sont :

PDIA ens = 1,11 x MAT ens (1 – DT) x dr	PDIA ens = 1,11 x 70,56 (1 – 0,72) x 0,70	**= 15,3**
$PDIM_N$ ens = 0,64 x MAT ens (DT – 0,10)	$PDIM_N$ ens = 0,64 x 70,56 (0,72 – 0,10)	**= 27,9**
$PDIM_E$ ens = 0,093 x MOF ens	$PDIM_E$ ens = 0,093 x 570,24	**= 53,0**

Et les deux valeurs azotées PDIN et PDIE de notre maïs fourrager ensilage sont :

PDIN = PDIA + $PDIM_N$	= 15,3+ 27,9	= 43,2	≈ **43**
PDIE = PDIA + $PDIM_E$	= 15,3+ 53,0	= 68,3	≈ **68**

1.5. Valeur d'encombrement

La valeur d'encombrement (VEF), mesurée en UEL/kg MS (unité d'encombrement lait) se calcule, comme dans les exemples précédents par la formule :

VEF ens = 140/QIL ens (UEL/kg MS)

où QIL représente l'ingestibilié du fourrage, qu'il faut calculer à l'aide de l'équation de prédiction choisie dans le tableau XIII.8 qui est, pour le maïs fourrager ensilage :

QIL ens = 2,39 dMO ens + 1,44 MS ens -76,4

VEF ens = 140/ QIL ens (UEL/kg MS) = 140/149 = **0,94 UEL/kg MS**	avec	QIL ens = 2,39 dMO ens + 1,44 MS ens -76,4 = (2,39 x 72,51) + (1,44 x 36,23) – 76,4 = **149**

1.6. Récapitulation

La valeur alimentaire de l'ensilage de maïs fourrager en balle ronde enrubannée calculée à partir d'une analyse effectuée sur fourrage vert est :

Type de fourrage	% MS	/kg MS		g/kg MS			
		UEL	UFL	PDIN	PDIE	Ca_{abs}	P_{abs}
Ensilage de maïs fourrager	36	0,94	0,92	43	68	--	--

2. Calcul de la valeur alimentaire d'un ensilage de maïs fourrager à partir d'une analyse effectuée sur ensilage

Dans cette démarche il y a deux préalables à respecter avant de calculer la valeur alimentaire de l'ensilage au lieu d'un seul comme dans le cas précédent :

- corriger les valeurs d'analyse de l'ensilage fournies par le laboratoire (voir paragraphe suivant);
- convertir les données corrigées de l'ensilage en données pour le fourrage vert correspondant. Ces conversions sont nécessaires pour calculer l'énergie brute (tableau XIII.1) et la dMO (tableau XIII.2), étant donné que ces paramètres ne peuvent être prédits que sur fourrage vert pour le cas du maïs fourrager avant d'être transférés ensuite à l'ensilage par les équations appropriées.

2.1. Correction des valeurs d'analyse de l'ensilage fournies par le laboratoire

Les raisons de cette correction résident dans le fait qu'un ensilage a la même composition chimique que le fourrage vert dont il est issu mais à laquelle se rajoutent d'autres composants produits par la fermentation tels que les acides gras volatils (AGV), l'ammoniac et l'alcool. Ces substances qui contribuent aussi à la valeur alimentaire de l'aliment sont dites «volatiles», c'est-à-dire qu'elles se « volatilisent », «s'évaporent», «disparaissent» à la chaleur lorsqu'on chauffe à l'étuve, un échantillon d'ensilage pour déterminer sa matière sèche (chapitre XI). Si on ne tient pas compte de la quantité de ces produits qui se «volatilisent» à l'étuve, la MS obtenue sera sous-estimée et par conséquent les quantités qui seront supposées ingérées par les animaux aussi. Il est donc nécessaire, avant d'utiliser l'analyse d'un ensilage pour calculer sa valeur alimentaire, de corriger sa teneur en MS et exprimer les autres éléments en fonction de celle-ci. Cet ajustement s'effectue en multipliant les données d'analyse du laboratoire par un coefficient dit facteur de correction (FC) fourni dans la dernière colonne du tableau XIII.7.1 :

$MS\ ens_{corr}$ (%) = MS ens (%) x FC

$MM\ ens_{corr}$ = MM ens x FC

$CB\ ens_{corr}$ = CB ens x FC

$DCS\ ens_{corr}$ = DCS ens x FC

$MAT\ ens_{corr}$ = MAT ens x FC

2.2. Conversion des données corrigées de l'ensilage en données pour le fourrage vert correspondant

Comme dans le premier cas, l'énergie brute (EB) doit d'abord être calculée sur le fourrage vert par l'équation :

$$\mathbf{EBo\ vert = 4487 + 2{,}019\ MAT_O\ vert}$$

Puis, extrapolée à l'ensilage par l'expression :

$$\mathbf{EBo\ ens = EBo\ vert + 25}$$

Par conséquent il faut convertir les données corrigées de l'ensilage en données pour le fourrage vert correspondant à l'aide des équations de conversion fournies par le tableau XIII.9 en les inversant dans ce cas, puisque contrairement au cas précédent, on exprime ici les données du fourrage vert en fonction de celles du fourrage ensilé.

MM ens = MM vert	MM vert = MM ens
MAT ens = 0,98 MAT vert	MAT vert = MAT ens / 0,98
CB ens = 1,05 CB vert	CB vert = CB ens / 1,05
dM0 ens = d MO vert	dMO vert = dM0 ens

La conversion de la DCS de maïs fourrager ensilage à maïs fourrager vert se fait à l'aide de l'équation ci-après, fournie par le tableau XIII.10

$$DCS\ vert = 34{,}1594 + (0{,}58\ DCS\ ens_{cor}) + (0{,}0409\ MAT\ ens_{cor}) - (0{,}0276\ CB\ ens_{cor}) - (0{,}0623\ MS\ ens_{cor})$$

Enfin pour ce qui est des données complémentaires (kmo, MO, MATo et CBo) il faut les calculer, également, sur la base des données de l'ensilage corrigé (ens_{cor}) que sur celle du fourrage vert (vert).

Cette démarche n'est pas plus compliquée que celle du premier cas comme on va le voir dans l'exemple ci-après sauf qu'elle retient un peu plus d'attention et nécessite quelques calculs supplémentaires. Voici un exemple d'analyse sur maïs fourrager ensilage tel que fournie par le laboratoire et les calculs de correction et de conversion à effectuer qui va éclairer tout cela.

Ci-après l'analyse chimique sur maïs fourrager ensilé[99] telle que supposée avoir été fournie par le laboratoire.

	%/kg MS		**g/kg MS**				
Type de fourrage	**MS ens**	**DCS ens**	**MM ens**	**MAT ens**	**CB ens**	**Ca_{abs}**	**P_{abs}**
Maïs fourrager ensilage	32	68	45	72	185	--	--

2.3. Données d'analyse corrigées et converties pour fourrage vert correspondant

	FC	**%/kg MS**		**g/kg MS**		
		MS	**DCS**	**MM**	**MAT**	**CB**
Données d'analyse originales (ens)		32	68	45	72	185
Données d'analyse corrigées (ens_{cor})[100]	1,03	32,96	70,04	46,35	74,16	190,55
Données corrigées et converties (vert)[101]			**70,50**	46,35	75,67	181,48

La conversion de la DCS de maïs fourrager ensilage corrigé à maïs fourrager vert est effectuée comme suit

DCS vert = 34,1594 + (0,58 DCS ens_{cor}) + (0,0409 MAT ens_{cor}) – (0,0276 CB ens_{cor}) – (0,0623 MS ens_{cor})
= 34,1594 + (0,58 x 70,04) + (0,0409 x 74,16) – (0,0276 x 190,55) – (0,0623 x 32,96)
= **70,50**

2.4. Données complémentaires calculées pour maïs fourrager ensilé et en vert sur la base des données corrigées

	sans unité	**(g/kg MS)**	**(g/kg MO)**	
	kmo (1000- 46,35) /1000	**MO** MO = 1000 – 46,35	**MATo**	**CBo**
Sur base ens_{cor}	≈ 0,954	≈ 954	74,16 / 0,954	190,55 / 0,954
			77,74	199,74
Sur base vert	≈ 0,954	≈ 954	75,67 / 0,954	181,48 / 0,954
			79,32	190,23

2.5. Valeur énergétique

2.5.1. Rappel

La valeur énergétique d'un fourrage, exprimée en unité fourragère lait (UFL), est égale à son énergie nette de lactation (ENL) rapportée à l'énergie nette de l'orge de référence fixée à 1700 kcal. Soit :

Valeur énergétique d'un fourrage (UFL) = ENL kcal

[99] Idem que note de bas de page N° 98.
[100] La correction est effectuée en multipliant les données de l'analyse originale par le facteur de correction (FC = 1,03) fourni par le tableau XIII.7.1 à la ligne « maïs fourrager ensilage 30% MS ».
[101] La conversion est effectuée par les équations inversées provenant du tableau XIII.9 et rappelées au paragraphe plus haut sauf pour la DCS qui se calcule par l'équation qui figure au tableau XIII.10 également mentionnée au paragraphe plus haut.

1700 kcal

Pour le cas du maïs fourrager ensilage avec une analyse effectuée sur ensilage, ENL se calcule avec les données corrigées de l'analyse tel que :

$$\mathbf{ENL\ ens_{cor} = EB\ ens_{cor} \times dE\ ens_{cor} \times EM\ ens_{cor}/ED\ ens_{cor} \times k_l}$$

2.5.2. Calcul de l'énergie brute (EB) et de l'énergie digestible dE

Comme évoqué au premier cas, Il faut d'abord calculer l'énergie brute du maïs fourrager vert par l'équation appropriée du tableau XIII.1 :

$$\mathbf{EBo\ vert = 4487 + 2{,}019\ MAT_O\ vert}$$

et l'extrapoler ensuite au maïs ensilage par l'équation :

$$\mathbf{EBo\ ens = EBo\ vert + 25}$$

en n'oubliant pas bien sûr d'exprimer à la fin du calcul, l'énergie brute du maïs ensilage par la formule :

$$\mathbf{EB\ ens = EBo\ ens \times kmo\ ens}$$

Maïs fourrager vert	Maïs fourrager ensilage
EBo vert = 4487 + 2,019 MAT_O vert = 4487 + (2,019 x 79,32) = 4647 kcal/kg de MO	**EBo ens_{cor} = EBo vert + 25** EBo ens_{cor} = 4647 + 25 = 4672 kcal/kg de MO
	EB ens_{cor} **= EBo** ens_{cor} **x kmo** EB ens_{cor} = 4672 x 0,954 = **4457** kcal/kg de MS
dMO vert = 0,55 DCS + 0,0732 MATo vert + 28,5 = (0,55 x 70,50) + (0,0732 x 79,32) + 28,5 = 73,08%	dMO ens_{cor} = dMO vert = 73,08%
	dE ens_{cor} **= 1,001 dMO** ens_{cor} **– 2,86** dE ens_{cor} = (1,001 x 73,08) – 2,86 = **70,30% ou 0,703**

2.5.3. Calcul du rapport EM/ED

$\mathbf{\dfrac{EM\ ens_{cor}}{ED\ ens_{cor}} = \dfrac{84{,}17 - 0{,}0099\ CBo\ ens_{cor} - 0{,}0196\ MATo\ ens_{cor} + 2{,}21\ NA}{100}}$
$\dfrac{EM\ ens_{cor}}{ED\ ens_{cor}} = \dfrac{84{,}17 - (0{,}0099 \times 199{,}74) - (0{,}0196 \times 77{,}74) + (2{,}21 \times 1{,}20)}{100}$
$\dfrac{EM\ ens\ cor}{ED\ ens\ cor} = \mathbf{0{,}833}$

Avec NA = 1,20 pour maïs fourrager vert ou ensilé (tableau XIII.3)

2.5.4. Calcul de k_l

Équations	Maïs ensilage > 30% MS
EM ens_{cor} = EB ens_{cor} x dE ens_{cor} x EM ens_{cor} / ED ens_{cor}	EM ens_{cor} = 4457 x 0,703 x 0,833 = 2610 kcal/kg de MS
$\mathbf{q = \dfrac{EM\ ens_{cor}}{EB\ ens_{cor}}}$	$q = \dfrac{2610}{4457} = 0{,}585$
$\mathbf{k_l = 0{,}24\ q + 0{,}4632}$	k_l = (0,24 x 0,585) + 0,4632 = **0,604**

2.5.5. Calcul de l'énergie nette de lactation (ENL) et de la valeur énergétique de l'ensilage de maïs exprimée en UFL

$$\textbf{ENL ens}_{\textbf{cor}} \textbf{ = EB ens}_{\textbf{cor}} \textbf{ x dE ens}_{\textbf{cor}} \textbf{ x EM ens}_{\textbf{cor}}\textbf{/ED ens}_{\textbf{cor}} \textbf{ x k}_{\textbf{l}}$$
$$= 4457 \text{ x } 0{,}703 \text{ x } 0{,}833 \text{ x } 0{,}604$$
$$= \textbf{1576 kcal/kg de MS}$$

La valeur énergétique exprimée en UFL de l'ensilage de maïs fourrager, calculée à partir de l'analyse d'un prélèvement sur ensilage est :

$$\boxed{\textbf{UFL ens / kg de MS} = \frac{\textbf{1576}}{\textbf{1700}} = \textbf{0,93}}$$

2.6. Valeur azotée

$$\text{PDIN ens}_{\text{cor}} = \text{PDIA ens}_{\text{cor}} + \text{PDIM}_{\text{N}} \text{ ens}_{\text{cor}}$$
$$\text{PDIE ens}_{\text{cor}} = \text{PDIA ens}_{\text{cor}} + \text{PDIM}_{\text{E}} \text{ ens}_{\text{cor}}$$

Avec :

$$\textbf{PDIA ens}_{\textbf{cor}} \textbf{ = 1,11 x MAT ens}_{\textbf{cor}} \textbf{ (1-DT) x dr}$$
$$\textbf{PDIM}_{\textbf{N}} \textbf{ ens}_{\textbf{cor}} \textbf{ = 0,64 x MAT ens}_{\textbf{cor}} \textbf{ (DT – 0,10)}$$
$$\textbf{PDIM}_{\textbf{E}} \textbf{ ens}_{\textbf{cor}} \textbf{ = 0,093 x MOF ens}_{\textbf{cor}}$$

- MAT $\text{ens}_{\textbf{cor}}$ (= 74,16 g/kg MS) est fournie ci-dessus par calcul à partir des données de l'analyse corrigées (ens_{cor}).
- La dégradabilté théorique (DT) et la digestibilté réelle (dr) sont fournies directement par les tableaux XIII.4 et XIII.6 à la ligne correspondant à maïs fourrager ensilage, soit :

DT = 72% ou **0,72**	**dr = 70%** ou **0,70**

- PF = 88 g/kg MS pour une matière sèche de 32,96% arrondie à 33%. (tableau XIII.7.2)
- MG = 28 g/kg MS quelle que soit la matière sèche (tableau XIII.7.1, ligne «maïs fourrager ensilage»)
- MOF est à calculer avec la valeur des paramètres présentés ci-dessus.

MOF ens$_{\textbf{cor}}$ = MOD ens$_{\textbf{cor}}$ – (PF + MG + MANDS ens) = 697 – (88 + 28 + 20,76) = **560 g/kg MS**	avec	MOD ens$_{\textbf{cor}}$ = MO ens$_{\textbf{cor}}$ x dMO ens$_{\textbf{cor}}$ = 954 x 73,08% = **697 g/kg MS**
		MANDS ens$_{\textbf{cor}}$ = MAT ens$_{\textbf{cor}}$ (1-DT) = 74,16 (1-0,720) = **20,76 g/kg MS**
		PF = 88
		MG = 28

Les teneurs en PDIA ens, PDIM_{N} ens et PDIM_{E} ens sont :

PDIA ens$_{\textbf{cor}}$ = 1,11 x MAT ens$_{\textbf{cor}}$ (1 – DT) x dr	PDIA **ens$_{\textbf{cor}}$** = 1,11 x 74,16 (1 – 0,72) x 0,70	**= 16,1**
PDIM$_{\textbf{N}}$ ens$_{\textbf{cor}}$ = 0,64 x MAT ens$_{\textbf{cor}}$ (DT – 0,10)	PDIM$_{\text{N}}$ **ens$_{\textbf{cor}}$** = 0,64 x 74,16 (0,72 – 0,10)	**= 29,4**
PDIM$_{\textbf{E}}$ ens$_{\textbf{cor}}$ = 0,093 x MOF ens$_{\textbf{cor}}$	PDIM$_{\text{E}}$ **ens$_{\textbf{cor}}$** = 0,093 x 560	**= 52,0**

Et les deux valeurs azotées PDIN et PDIE de notre mais fourrager ensilage sont :

PDIN = PDIA + $PDIM_N$	= 16,1+ 29,4	= 45,5	≈ **46**
PDIE = PDIA + $PDIM_E$	= 16,1+ 52,0	= 68,1	≈ **68**

2.7. Valeur d'encombrement

$$\textbf{VEF ens}_{cor} \textbf{ = 140 / QIL ens}_{cor} \text{ (UEL / kg MS)}$$

QIL représente l'ingestibilié du fourrage, qu'il faut calculer à l'aide de l'équation de prédiction choisie dans le tableau XIII.8 qui est, pour « maïs fourrager ensilage » :

$$\textbf{QIL ens}_{cor} \textbf{ = 2,39 dMO ens}_{cor} \textbf{ + 1,44 MS ens}_{cor} \textbf{ -76,4}$$

VEF ens_{cor} = 140 / QIL ens (UEL/kg MS) = 140 / 145,72 = **0,96 UEL/kg MS**	avec	QIL ens_{cor} = 2,39 dMO ens + 1,44 MS ens -76,4 = (2,39 x 73,08) + (1,44 x 32,96) – 76,4 = **145,72**

2.8. Récapitulation

Valeur alimentaire de l'ensilage de maïs fourrager en balle ronde enrubannée calculée à partir d'une analyse sur ensilage :

Type de fourrage	% MS	/kg MS		g/kg MS			
		UEL	UFL	PDIN	PDIE	Ca_{abs}	P_{abs}
Ensilage de maïs fourrager	33	0,96	0,93	46	68	--	--

3. Calcul de la valeur alimentaire d'un ensilage de vesce-avoine à partir d'une analyse effectuée sur fourrage vert avant ensilage

Ce cas est fictif mais s'appuie sur une vraie analyse publiée par l'ITELV. Il sert à illustrer la démarche de calcul, un peu complexe de la valeur alimentaire d'un ensilage de vesce-avoine (ou tout autre mélange de ce type) à partir d'une analyse effectuée sur fourrage vert. Ici la MS fournie par l'analyse sur vert est égale à 35,6%. Elle est supérieure à 25% et inférieure à 50%, on considère qu'il s'agit d'un ensilage préfané conservé en balles rondes enrubannées ou en silo meule et on utilisera les équations de prédiction relatives à ce type d'ensilage. Les données d'analyse sur échantillon prélevé sur vert au stade avoine grains pâte dure et vesce gousses pâteuses sont présentées dans le tableau ci-après.

Type de fourrage	%/kg MS	g/kg MS					
	MS vert	DCS vert	MM vert	MAT vert	CB vert	Ca_{abs}	P_{abs}
Vesce-avoine ensilage - Avoine : grains pâte dure - Vesce : gousses pâteuses	35,6	--	89	129	297	4,5	1,9

3.1. Calculs intermédiaires

Calcul de la proportion de légumineuses (vesce) dans le mélange vesce-avoine

La teneur en MAT est supérieure à 75 g/kg MS, on peut donc calculer les proportions graminées/légumineuses dans le mélange avec la formule :

$$\textbf{\% légumineuses = 0,6054 MAT vert - 31,534}$$

% légumineuses = (0,6054 x 129) - 31,534 = **46,6 %**	
% graminées = 100% - 46,6% = **53,4%**	

Equations de conversion des données fournies sur fourrage vert en données pour fourrage ensilé (extraits du tableau XIII.9)

Comme dans le calcul pour le maïs fourrager (prédiction à partir d'une analyse effectuée sur fourrage vert avant ensilage), on convertit les données de l'analyse (MAT et CB) pour fourrage vert en valeurs pour fourrage ensilage avant d'utiliser les équations de prédiction. Ces conversions sont effectuées à l'aide des formules extraites du tableau XIII.9 aux lignes correspondantes à ensilage préfané dans les catégories prairies de graminées et prairies de légumineuses et résumées dans le tableau ci-après. Les équations pour dMO et DT seront utilisées dans les calculs plus loin.

Graminée (avoine)	**Légumineuse (vesce)**
MS ens = MS vert	MS ens = MS vert
MM ens = 0,882 MM vert + 21	MM ens = MM vert
MAT ens = 0,859 MAT vert + 26,3	MAT ens = MAT vert
CB ens = 0,935 CB vert + 31	CB ens = 0,657 CB vert + 112
dM0 ens = 0,920 dMO vert + 4	dM0 ens = 0,920 dMO vert + 3
DT ens = 0,56 DT vert - 0,25 MS ens + 46,5	

Conversion des données de fourrage vert à fourrage ensilage

Le calcul de conversion est effectué au prorata de l'avoine (53,4%) et de la vesce (46,6%). Exemple, on calcule la MAT de l'ensilage du mélange avoine/vesce comme suit :

MAT ens mélange = (MAT ens avoine x 53,4%) + (MAT ens vesce x 46,6%)
MAT ens mélange = [((0,859 x 129) + 26,3) x 53,4%] + [(129 x 46,6%)] = 133,3

%/kg MS		**g/kg MS**		
MS ens	**DCS ens**	**MM ens**	**MAT ens**	**CB ens**
35,6		94,6	133,3	308

Données complémentaires calculées sur base MO

	sans unité	**(g/kg MS)**	**(g/kg MO)**	
	kmo	**MO**	**MATo**	**CBo**
	(1000-MM)/1000	MO = 1000 – MM	MAT / kmo	CB / kmo
Fourrage vert	0,911	911	141,6	326,0
Ensilage		905	146,4	338,1

3.2. Valeur énergétique

UFL ens = ENL ens kcal/1700 kcal
ENL ens = EB ens x dE ens x EM ens / ED ens x k_l

Energie brute (EB) et énergie digestible dE

Comme pour la vesce avoine en vert, il faut calculer au prorata des deux familles botaniques qui composent le mélange. Mais comme il s'agit d'un ensilage, il faut (comme dans le cas du maïs fourrager précédemment étudié) calculer d'abord l'énergie brute de la vesce-avoine verte sur base MO (EBo vert), l'exprimer ensuite sur base MS par la formule (EB vert = EBo vert x kmo) et extrapoler ce résultat à la

vesce-avoine ensilage par l'équation (EB ens = EB vert x 1,03) puisqu'il s'agit d'un ensilage préfané (tableau XIII.1, ligne prairie temporaire graminées ou légumineuses)

EBo vert gram = 4520 + 1,735 MAT_O vert et **EBo vert leg = 4613 + 1,735 MAT_O vert**

EBo = [(4520 + (1,735 x 141,6)) x 53,4%] + [(4613 + (1,735 x 141,6)) x 46,6%] = **4809** kcal/kg de MO
EB vert = EB_O vert x kmo = 4809 x 0,911 = **4381** kcal/kg de MS
EB ens = EB vert x 1,03 = 4512 kcal/kg de MS

Digestibilité de la matière organique (dMO)

La DCS, n'est pas fournie, on utilisera alors les équations qui expriment la dMO en fonction de la teneur en cellulose brute (1ère colonne du tableau XIII.2). Pour l'avoine on utilise l'équation pour fourrage vert de prairie temporaire à dominance graminées et pour la vesce, celle correspondant à dominance légumineuses. Comme dans le cas du maïs fourrager, on calcule la dMO sur vesce-avoine verte puis on extrapole le résultat sur vesce-avoine ensilage avec les équations du tableau XIII.9 résumé plus haut pour un ensilage préfané.

dMO vert gram = 90,8 - 0,091 CB vert + 0,035 MAT et **dMO vert leg = 95,5 - 0,101 CB vert**

dMO vert = [(90,8 - (0,091 x 297) + (0,035 x 129)) x 53,4%] + [(95,5 - (0,101 x 297)) x 46,6%] = **67%**

dM0 ens gram = 0,920 dMO vert + 4 et **dM0 ens leg = 0,920 dMO vert + 3**

dMO ens = [((0,920 x 67) + 4) x 53,4%] + [((0,920 x 67) + 3) x 46,6] = **65,2%**

Digestibilité de l'énergie (dE)

La digestibilité de l'énergie de la vesce-avoine ensilage est calculée par une équation commune aux graminées et aux légumineuses (tableau XIII.1); donc on n'utilise pas de pondération.

dE ens = 1,0263 dMO ens - 5,723

dE ens = (1,0263 x 65,2) – 5,723 = **61,2%** ou **0,612**

Rapport EM ens / ED ens avec NA = 1,5 pour ensilage

EM ens/ED ens = (84,17 – 0,0099 CBo ens – 0,0196 MATo ens + 2,21 NA)/100

EM ens/ED ens = [84,17 – (0,0099 x 338,1) – (0,0196 x 146,4) + (2,21 x 1,50)]/100 = **0,813**

Calcul de q et de k_l

EM ens = EB ens x dE ens x EM ens/ED ens

EM ens = 4512 x 0,612 x 0,813 = **2243** kcal/kg de MS

q = EM ens/ EB ens

q = 2243/4512 = **0,497**

k_l = 0,24 q + 0,4632

k_l = (0,24 x 0,497) + 0,4632 = **0,582**

Energie nette de lactation (ENL)

ENL = EB x dE x EM/ED x k_l

ENL = 4512 x 0,612 x 0,813 x 0,582 = **1306** kcal/kg de MS

Valeur énergétique de l'ensilage exprimée en UFL par kg de MS

UFL/kg MS = ENL/1700

UFL/kg MS = 1306/1700 = 0,77

3.3. Valeur azotée

Dégradabilté théorique de l'ensilage (DT ens)

On calcule la DT de la vesce-avoine verte au prorata des deux espèces avec les équations du tableau XIII.4 : fourrage vert de prairie à graminées pour l'avoine et de prairie à légumineuses pour la vesce. Comme pour la dMO on extrapole ensuite le résultat sur vesce-avoine ensilage avec l'équation du tableau XIII.9 résumé plus haut. On notera respectivement DT vert gram et DT vert leg, les DT pour l'avoine et la vesce, DT vert pour la vesce-avoine en vert et DT ens pour la vesce-avoine ensilage.

DT vert gram = 60 + 0,14 MAT - 0,00017 MAT^2 et DT vert leg = 58 + 0,14 MAT - 0,00017 MAT^2

DT = [(60 + (0,14 x 129) – (0,00017 x 129^2)) x 0,534] + [(58 + (0,14 x 129) – (0,00017 x 129^2)) x 0,466]
= 40,2 + 34,1
= **74,3 %**

DT ens = 0,56 DT vert – 0,25 MS ens + 46,5

DT ens = (0,56 x 74,3) – (0,25 x 35,6) + 46,5 = **79,2% ou 0,792**

Digestibilté réelle de l'ensilage (dr ens)

Maintenant que nous avons calculé la dégradabité théorique de la vesce-avoine ensilage (DT ens), il est facile de calculer sa digestibilité réelle (dr ens) et la matière organique fermentescible (MOF ens) puisque celles-ci dépendent de la DT ens.

Dr ens = 100 x [MAND ens – PANDI ens]/MAND ens

dr ens = 100 x (30,77 – 9,57)/30,77 = **68,9%** ou **0,689**

Avec

MAND ens = 1,11 x MAT ens (1 – DT ens) = 1,11 x 133,3 (1 – 0,792) = **30,77**

Et

PANDI ens = 7,9 + 0,08 MAT ens – 0,00033 MAT$^2_{ens}$ + Δ_1 + Δ_2 + Δ_3
= 7,9 + (0,08 x 133,3) – (0,00033 x 133,3^2) – 3,13 = **9,57**

Δ1 = -1,9 pour 1er cycle
Δ2 = calculé au prorata de l'avoine (graminée) soit – 2,3 x 53,4% = - 1,23
Δ3 = 0 pour ensilage

Matière organique fermentescible de l'ensilage (MOF)

MOF ens = MOD ens – (PF + MG + MANDS ens)

MOF ens = 590 – (75 + 30 + 27,72) = **457** g/kg MS

Avec

MOD ens = MO ens x dMO ens = 905 x 65,2% = 590 g/kg MS
Et
MANDS ens = MAT ens (1-DT ens) = 133,3 x (1-0,792) = 27,72 g/kg MS

Dans le tableau XIII.7.1, ligne vesce-avoine ensilage préfané PF = 75 MG = 30

Valeurs de PDIA ens PDIN ens et PDIE ens

PDIA ens = 1,11 x MAT ens (1 – DT ens) x dr ens

PDIA ens = 1,11 x 133,3 (1 – 0,792) x 0,689 = **21**

$PDIM_N$ ens = 0,64 x MAT ens (DT ens – 0,10)

$PDIM_N$ ens = 0,64 x 133,3 (0,792 – 0,10) = **59**

$PDIM_E$ ens = 0,093 x MOF ens

$PDIM_E$ ens = 0,093 x 457 = **43**

Valeurs de PDIN et PDIE de l'ensilage de vesce-avoine exprimées en g de protéines par kg de MS

PDIN ens = PDIA ens + $PDIM_N$ ens = 21 + 59 = 80
PDIE ens = PDIA ens + $PDIM_E$ ens = 21 + 43 = 64

3.4. Valeur d'encombrement

On applique les équations du tableau XIII.8 correspondant à ensilage mi-fané de prairie temporaire graminées et légumineuses qu'on extrapole à la vesce-avoine pour calculer QIL (quantité ingestible par la vache laitière).

QIL ens gram = 99,5 + 0,167 dM0 ens + 0,128 MAT ens
QIL ens leg = 103,7 + 0,167 dM0 ens + 0,128 MAT ens

QIL ens = [(99,5 + (0,167 x 65,2) + (0,128 x 133,3)] x 53,4%] + [(103,7 + (0,167 x 65,2) + (0,128 x 133,3)] x 46,6%]
= **129,4**

Et on calcule la valeur d'encombrement (VEF) en UEL/kg MS par la formule

VEF ens = 140/ QIL ens (UEL/kg MS)

VEF ens = 140/129,4 = **1,08 UEL/kg MS**

3.5. Récapitulation

Type de fourrage	% MS	/kg MS		g/kg MS			
		UEL	UFL	PDIN	PDIE	Ca_{abs}	P_{abs}
Ensilage de vesce-avoine	35,6	1,08	0,77	80	64	4,52	1,95

CHAPITRE XVII : Pourquoi n'avons-nous pas une table de la valeur alimentaire de nos fourrages 60 ans après ?

Si on récapitule les résultats des calculs des chapitres XIV et XVI nous aboutissons à une mini-table de la valeur alimentaire des fourrages courants en Algérie (tableau XVII.2) calculée à partir des données de leur composition chimique regroupées dans le tableau XVII.1. On aurait pu continuer à calculer les valeurs d'autres fourrages: luzerne, Bersim, ray grass, sorgho, féverole, triticale, céréales immatures …, affiner les paramètres de stades de coupe, des conditions de culture, etc. et compléter par la valeur alimentaire de quelques concentrés (orge, avoine, triticale, pois, lupins, maïs grain …) ou de coproduits (rebuts de datte, marc de raisin, grignons d'olive, drêches de brasserie …). Mais là n'était pas le but. D'abord comme vous l'avez constaté, les calculs manuels sont longs et fastidieux aussi bien pour celui qui les fait que pour le lecteur. Ils peuvent aussi être facilement entachés d'erreur et ils auraient pris une place inconsidérée dans le livre au détriment des explications. Le but était de contribuer modestement à jeter les bases méthodologiques nécessaires à la pratique de nos techniciens et agronomes de terrain et fournir une explication commentée et illustrée par quelques exemples, de l'applicabilité des équations de prédiction du système français[102] au calcul de la valeur alimentaire de nos fourrages. Nous avons montré que leur application n'est pas « standard » et systématique. Elle dépend de la nature du fourrage, des conditions de prise de l'échantillon (avant ou après ensilage par exemple, conditions de fanage …) et de notre flexibilité à rattacher le type de fourrage à analyser à telle ou telle catégorie (prairie, culture annuelle, type d'ensilage…) pour aboutir à la meilleure extrapolation. Enfin, nous avons choisi différents types de fourrages dans les exemples traités pour attirer l'attention du lecteur sur la diversité des méthodes et des approches et comment éviter quelques petits « pièges » de calcul.

L'élaboration d'une table des valeurs alimentaires complète et officielle de nos fourrages et autres dérivés, dépasse les objectifs de cette contribution et nécessité des moyens spécifiques. Il y a là tout un « terrain de jeu » pour la recherche agronomique. Certains diront que ces équations, mises au point dans des conditions climatiques et de développement différentes des nôtres, ne sont pas adaptées à nos fourrages et nos élevages. Soit, mais maîtrisons les et testons les dans une table des valeurs alimentaires, ne serait-elle que provisoire et intermédiaire vers une autre qui sera plus précise et mieux documentée par l'expérience du terrain et l'évolution de la recherche. Cela ne nécessite que des analyses fourragères et du calcul qui peut être simplifié par une application informatique ou même par une feuille sur Excel. Quant aux analyses fourragères, leur réalisation est maintenant simplifiée par la spectrophotométrie infrarouge. Le coût d'acquisition de ces appareils est aujourd'hui abordable. Ils peuvent être installés dans les coins les plus reculés de nos campagnes et manipulés par les techniciens les moins chevronnés. Et avec internet, les résultats peuvent être transmis de manière quasi instantanée.

Il est important que ce travail fondamental se développe pour accompagner les efforts financiers colossaux investis dans le développement de la filière laitière en Algérie. Nous importons bien des génisses pleines alors pourquoi pas le mode d'emploi pour leur alimentation ? Faut-il l'adapter quelque peu !!! Quand nous achetons une machine, nous utilisons bien son mode d'emploi pour la faire fonctionner. Pourquoi pas pour nos vaches importées qui constituent 20% de notre cheptel bovin, matériel de surcroit vivant qui nécessite, pour l'exploiter, tout l'art de l'ingénieur agronome dont la pratique est un savant et subtil dosage entre la biologie et le génie. Et des agronomes chevronnés ils ne nous en manquent pas ! Et de bien valeureux, qu'ils soient dans les institutions de recherche, dans l'enseignement ou sur le terrain.

Mais revenons à nos vaches et nos fourrages. Voilà à quoi ressemble notre mini table des valeurs alimentaires des quelques fourrages calculées manuellement et que nous utiliserons dans les chapitres suivants qui seront consacrés au rationnement de la vache laitière.

[102] Tables INRA 2007, mise à jour 2010.

Tableau XVII.1. Composition chimique des fourrages ayant servi aux calculs de leurs valeurs alimentaires

	%		g/kg MS				
Type de fourrage	**MS**	**DCS**	**MM**	**MAT**	**CB**	**Ca_{abs}**	**P_{abs}**
Foin de prairie de montagne	86	55	80	75	350	1,4	1,2
Fourrage vert naturel de la Mitidja	26	65	84	88	332	--	--
Vesce-avoine en vert (avoine : épiaison, vesce : floraison)	16,6	--	116	124	315	5,6	1,6
Vesce-avoine en foin	88,7	60,5	96	54	391	2,7	0,7
Vesce-avoine ensilage (avoine : grains pâte dure, vesce : gousses pâteuses)	35,6	--	89	129	297	4,5	1,9
Maïs fourrager vert	35	70	43	72	185	--	--
Maïs fourrager ensilage	32	68	45	72	185	--	--

Tableau XVII.2. Récapitulation des valeurs alimentaires des fourrages calculées aux chapitres XIV et XVI. (Les valeurs des concentrés et coproduits sont extraites des tables INRA 2007)

Fourrages

	% MS	/kg MS		g/kg MS			
		UEL	**UFL**	**PDIN**	**PDIE**	**Ca_{abs}**	**P_{abs}**
Foin de prairie de montagne	86	1,15	0,7	49	73	1,4	1,2
Fourrage vert naturel de la Mitidja	26	1,05	0,83	56	78	--	--
Vesce-avoine en vert	16,6	1,08	0,74	79	76	5,6	1,6
Vesce-avoine en foin	88,7	1,17	0,72	33	67	2,7	0,7
Ensilage de vesce-avoine	35,6	1,08	0,77	80	64	4,5	1,9
Ensilage de maïs fourrager[103]	36	0,94	0,92	43	68	--	--
Ensilage de maïs fourrager[104]	33	0,96	0,93	46	68	--	--

Concentrés

	% MS	/kg MS		g/kg MS			
		UEL	**UFL**	**PDIN**	**PDIE**	**Ca_{abs}**	**P_{abs}**
Orge	86,7		1,09	79	101	0,5	3,0
Avoine	88,1		0,88	69	69	0,7	2,7
Triticale	87,3		1,16	72	96	0,5	3,0
Maïs	86,4		1,22	74	97	0,3	2,2
Sorgho	86,5		1,22	78	100	0,2	2,4

Coproduits et autres produits

	% MS	/kg MS		g/kg MS			
		UEL	**UFL**	**PDIN**	**PDIE**	**Ca_{abs} (g/j)**	**P_{abs} (g/j)**
Son de blé dur	86,6		0,92	107	87	0,9	8,0
Mélasse de canne	73,7		0,86	32	62	4,0	0,7
Drêches d'orge de brasserie déshydratées	91,9		0,82	194	171	1,3	4,9
Urée (par kg de produit brut)			0	1443	0	0	0

[103] Valeur alimentaire calculée sur base maïs fourrage vert
[104] Valeur alimentaire calculée sur base maïs fourrage ensilage

SIXIEME PARTIE

LE CALCUL DE LA RATION ALIMENTAIRE POUR LA VACHE LAITIERE

CHAPITRE XVIII : Démarches préliminaires au rationnement d'un troupeau laitier

Nous voilà enfin arrivé au bout de notre peine. A quoi sert-il de cultiver notre fourrage, de l'analyser et de le calculer si ce n'est pour nourrir notre vache. Et pour cela il faut connaitre les quantités à lui fournir pour éviter le gaspillage si on en lui donne trop et des rendements faibles en lait si on ne lui en donne pas assez. C'est le but de ce chapitre. Comment calculer la ration d'une vache laitière ou d'un troupeau bovin laitier.

Dans le tableau XVII.2 du chapitre précédent, nous avons regroupé les valeurs alimentaires de quelques fourrages disponibles ou potentiellement disponibles en Algérie. Le maïs fourrager par exemple, de plus en plus cultivé dans les périmètres irrigués des régions du sud à Ghardaia, El Ménéa, Adrar…, commence à être bien connu et utilisé par les éleveurs. Pour la vesce-avoine ensilage bien que très peu présente encore, elle est de plus en plus évoquée par diverses publications qui encouragent et vulgarisent sa production. Dans les chapitres qui suivent, nous apprendrons à calculer comment équilibrer une ration alimentaire d'un troupeau laitier en utilisant ces fourrages et éventuellement comment les complémenter par un aliment concentré (orge, maïs, ou autre concentré).

1. Démarches préliminaires à l'établissement d'une ration alimentaire pour les vaches laitières

Calculer une ration alimentaire pour une vache laitière consiste à établir la quantité (en kg de MS) et la qualité (composition en énergie et nutriments) d'un ou plusieurs aliments, composant cette ration, de manière à couvrir ses besoins d'entretien, de production et de gestation en énergie, protéines et minéraux.

Comme nous l'avons vu au chapitre V, les besoins en énergie et nutriments (protéines et minéraux) sont fournis par l'annexe A1 en fonction du poids de la vache, de sa production de lait et de son stade de gestation. Il en est de même pour la quantité de fourrage ingérée mesurée en kg de MS. Celle-ci dépend de la capacité d'ingestion de la vache (CI) (chapitre IX) qui se calcule selon l'annexe A3. Ces informations nous permettent de calculer les besoins d'une vache individuelle qui présente des caractéristiques individuelles. Or dans un troupeau aucune vache ne ressemble à l'autre. Le poids, la production laitière, le stade de lactation, de gestation, etc.…diffèrent d'une vache à l'autre et quand on a 20 ou 30 vaches en production à nourrir voire plus, il est difficile de calculer et de servir à chaque vache sa ration. On calcule donc une ration moyenne en définissant une vache moyenne ou une vache type représentative du troupeau.

Cette ration moyenne peut être calculée et distribuée pour l'ensemble du troupeau et tout le monde mange « la même soupe » en fonction d'un objectif global de production de lait. Exemple un éleveur de 20 vaches en production à une entente pour livrer 400 litres de lait par jour à la laiterie. Il distribuera donc à ses animaux une ration alimentaire calculée sur la base d'une production moyenne de 20 litres de lait par vache et par jour[105]. Bien sûr toutes les vaches ne vont pas produire exactement 20 litres par jour. Il y en a qui produiront plus et d'autres moins. Cette pratique a donc l'inconvénient de sous-alimenter les vaches qui produisent plus ou ont un potentiel de production élevé et de suralimenter celles moins productrices, mais elle a l'avantage d'être simple et peu contraignante pour l'éleveur. Si on cherche à mieux valoriser le potentiel laitier des vaches et gérer de manière plus économique les fourrages on peut diminuer cette inconvénient de « sur et sous-alimentation », en divisant le troupeau en deux ou trois lots selon la production laitière journalière par vache.

Si on répartit les vaches en deux lots, on constitue le premier lot avec les vaches les plus performantes et le second avec le reste des animaux. On considère la moyenne du troupeau comme le seuil de division des deux groupes. Dans le cas de notre exemple, le premier lot comprendra les vaches ayant une lactation supérieure à 20 litres auxquelles on rajoute toutes les vaches ayant moins de 75 jours en lactation (car ces

[105] En réalité la production laitière journalière de nos vaches est malheureusement souvent inférieure à ce niveau. Une enquête réalisée auprès d'une centaine d'éleveurs de la région de Tizi Ouzou par Kadi Si Ammar publiée dans son mémoire de magistère en 2007 montre que 70% des exploitations enquêtées produisent entre 10 et 15 litres et pour certaines moins de 10 litres. Dans le cadre de la même enquête, une analyse plus approfondie auprès de 6 exploitations dont le nombre de vaches varie entre 14 et 97 vaches montre que ce volume de production journalière par vache est sensiblement le même, quel que soit la taille du troupeau. Il se situe autour de 13,5 litres/vache/jour. Les vaches de ces élevages sont de race montbéliarde et Holstein qui dans les conditions adéquates produisent autour de 30 à 35 litres/vache /jour.

vaches n'ont pas encore atteint le stade optimum de production) et dans le second lot les vaches avec une lactation inférieure à 20 litres. Si on réalise 3 lots, on constitue le 1er groupe avec les vaches ayant une lactation de 25% supérieure à la moyenne, le second avec les vaches ayant une lactation inférieure de 25% à la moyenne et le troisième avec tout le reste. On peut reprendre l'exemple de notre troupeau à 20 litres/vache /jour pour illustrer les critères de regroupement des vaches dans ce cas.

Lot 1 : 20 l + (20 x 25%) = vaches ayant une production de 25 litres et plus
Lot 2 : 20 l – (20 x 25%) = vaches ayant une production comprise entre 15 et 25 litres
Lot 3 : vaches ayant une production de moins de 15 litres

Les rations alimentaires qui seront calculées en fonction des performances de chaque lot seront plus précises mais les contraintes pour l'éleveur plus importantes. Il sera obligé d'accorder plus de temps et plus de soins à l'alimentation des animaux. Mais quel que soit la méthode adoptée, Il faut calculer une vache type ou vache moyenne qui servira de référent au calcul de la ration.

2. La vache type

Pour calculer une ration alimentaire moyenne, il faut disposer des caractéristiques d'une vache fictive dite vache type qui représente les caractéristiques moyenne du troupeau ou des lots dont :

- la production laitière et les taux de MG et de protéines du lait,
- le poids,
- l'âge,
- le stade de gestation et de lactation
- et la note d'état[106] c'est-à-dire l'état d'embonpoint ou de maigreur des vaches.

Le poids est mesuré normalement par pesage mais à défaut d'une balance on peut l'estimer par la mesure du tour de poitrine des vaches (annexe B1). Pour l'âge moyen ainsi que pour les stades de lactation et de gestation, on fait une approximation en se basant sur un stade moyen selon le nombre le plus élevé des vaches à tel stade ou un autre. La note d'état est estimée par une note moyenne du troupeau (annexe B2).

Toutes ces caractéristiques sont estimées par une moyenne calculée ou observée sur le troupeau à l'exception de la production laitière. Celle-ci désignée par l'expression « production laitière type », est calculée par une majoration de la production laitière moyenne journalière du troupeau.

3. Calcul de la production laitière type

La production laitière de la vache type, est le principal critère qui sert à ajuster la ration alimentaire. On la calcul soit pour le troupeau entier, auquel cas on considère qu'il s'agit d'un seul lot soit pour chaque lot qui découle de la subdivision de celui-ci. Dans tous les cas, troupeau entier ou divisé par lot, la production type doit être supérieure à la production moyenne du troupeau entier ou à celle des lots pour éviter la sous-alimentation des vaches performantes.

Dans le système Nord-Américain[107] que nous proposons ici, la production laitière type d'une vache type est calculée pour le troupeau entier en majorant la moyenne[108] par un **facteur de 1,31**. Si par contre on réalise deux lots, on recalcule la moyenne de chaque lot et on majore celle du premier (qui a la plus forte moyenne) par un **facteur de 1,17** et celle du second par un **facteur de 1,22**. Si on a un grand effectif de vaches en production on peut aller jusqu'à 3 lots pour améliorer la précision de la ration alimentaire. Dans ce cas les facteurs de majoration applicables à la moyenne de production de lait journalière du lot seront **1,14 pour le premier lot, 1,08 pour le second et 1,21 pour le dernier**.

Reprenons l'exemple ci-dessus composé de 20 vaches avec une moyenne journalière de 20 litres et calculons la production type de la vache type.

[106] La note d'état est une appréciation subjective de l'embonpoint ou de la maigreur de la vache et se note sur une échelle de 1 à 5 par un observateur qui se met en arrière de la vache pour observer son état selon la procédure mentionnée à l'annexe B2.
[107] Guide bovins laitiers. Conseil des productions animales du Québec.
[108] C'est la moyenne journalière établie sur une période de temps.

- Si la vache type est déterminée pour le troupeau entier, sa production type sera :

Troupeau : 20 x 1,31 = **26,2 litres de lait**

- Si le troupeau est divisé en deux lots on calcule une production type pour chacun des lots sur la base de la moyenne de chacun d'eux. Pour l'exemple, deux lots ayant une moyenne calculée de 24 litres pour le premier et de 16 litres pour le second auront la production laitière type suivante :

Lot 1 : 24 x 1,17 = **28,0 litres de lait**

Lot 2 : 16 x 1,22 = **19,5 litres de lait**.

Si on ne dispose pas de données sur les moyennes de chacun des lots (ce qui est généralement le cas dans nos élevages, faute d'un suivi individualisé de la production laitière par vache), on utilise alors les valeurs préétablies du tableau XVIII.1 ci-après qui fournit les niveaux des productions types en fonction de la production moyenne journalière calculée pour le troupeau entier. Cette méthode est approximative et fournit par prudence, une production type plus élevée par rapport aux précédentes. Si on reprend l'exemple ci-dessus, mais calculé avec les données fournies par le tableau XVIII.1, pour une moyenne réelle de 20 litres on obtient une production type pour :

le troupeau entier :

Troupeau : **30,4 litres de lait**

et pour deux lots :

Lot 1 : **32,6 litres de lait**
Lot 2 : **20,1 litres de lait**

Tableau XVIII.1. Production type en fonction de la production moyenne journalière réelle du troupeau de vaches (Source : Guide bovins laitiers. Conseil des productions animales du Québec)

Litres/vache/jour	1 Lot	2 Lots		3 lots		
		Lot 1	Lot 2	Lot 1	Lot 2	Lot 3
14	20,0	21,7	13,2	22,0	16,0	10,1
16	22,9	24,8	15,1	25,1	18,3	11,5
18	26,5	28,5	17,4	28,7	20,7	12,7
20	30,4	32,6	20,1	33,0	24,4	15,8
22	33,0	34,8	20,2	35,6	25,8	16,0
24	36,4	38,5	22,5	39,6	29,6	19,6
26	39,3	41,6	24,3	42,5	30,9	19,4
28	43,1	45,6	27,0	46,8	34,6	22,5
30	46,6	49,3	29,3	50,3	37,0	23,6

4. Exemple de « Construction » de la vache type pour un troupeau de 20 vaches avec une production laitière moyenne de 20 litres/vache/jour

Soit à définir une « vache type » pour calculer la ration de notre troupeau de 20 vaches qui fournit une production laitière moyenne de 20 litres/vache/jour.

- **Production laitière type : 26,2 litres**, calculée sur une moyenne réelle de 20 litres par la formule (20 x 1,31 = **26,2**), équivalente en poids [109] à **27 kg**
- Taux butyreux ou matière grasse **TB = 36 g/kg** et taux de protéines **TP = 30 g/kg** (données supposées être obtenues auprès de la laiterie à qui le lait est livré)
- **Poids** (fictif) **: 600 kg** (moyenne du poids des vaches du troupeau mesuré individuellement par pesée ou mesure du tour de poitrine)

[109] Pour convertir en kg de lait, il faut multiplier la quantité en litres par la densité du lait (1,03). Soit : 26,2 litres x 1,03 = 27 kg.

- **Note d'état = 2,5**. Comme cet état varie d'une vache à l'autre et qu'on ne peut pas faire une moyenne d'observations subjectives, on prend une note médiane se situant entre 1 et 5 selon l'état dominant dans le troupeau. Dans notre exemple, nous considérons une note médiane de 2,5.

Il nous reste maintenant à trouver **l'âge** de notre vache, si elle est **primipare ou multipare** et à quel **stade de gestation et de lactation** elle est. C'est quatre paramètres sont liés et dépendent de la durée de vie productive de la vache.

La durée de vie biologique d'une vache est de 20 ans environ, mais sa durée de vie productive est de 5 à 6 ans dans les élevages productivistes européens et nord-américains. Au-delà de cet âge, elle est réformée car sa production de lait baisse et devient non rentable. Les coûts d'alimentation deviennent plus élevés que les bénéfices rapportés par la vente de son lait et 30% environ du troupeau est renouvelé à chaque année. En Algérie ni dans le reste du Maghreb, il n'y a pas d'étude sur les taux de réforme des vaches laitières et on ne connait pas de manière précise leur durée de vie productive. Plus longue ou plus courte ? On ne sait pas. Si on se base sur les données européennes, en 6 ans une vache vêlerait 4 fois à partir de son 24ème mois et fera 4 lactations de 10 mois chacune. Donc si on place l'âge de notre vache type à 40 mois c'est-à-dire dans un âge médian de sa vie productive qui est de plus ou moins 72 mois (6 ans), on peut la considérer donc représentative de la moyenne des âges du troupeau. A cet âge, notre vache est multipare puisqu'elle est à son deuxième vêlage fait à 36 mois si elle a été inséminée 3 mois après son premier vêlage survenu au 24ème mois et à sa 17ème semaine de lactation, puisqu'il y a 120 jours entre le 36ème mois (vêlage) et le 40ème mois.

En résumé notre vache type serait une vache multipare **âgée de 40 mois, gestante de 5 ou 6 semaines** si elle a été inséminée 3 mois après son 2ème vêlage et à la **17ème semaine de lactation**. Voilà, nous avons toutes les caractéristiques de notre troupeau maintenant regroupées dans la vache type.

CHAPITRE XIX : Equilibrer une ration alimentaire en production laitière

Une ration alimentaire suffisante et équilibrée est à la base d'une alimentation adéquate de la vache pour une production optimale de lait. Il peut arriver qu'un fourrage distribué seul ne couvre pas l'ensemble des besoins de la vache, parce que celui-ci, bien que présentant suffisamment d'énergie, soit déficitaire en protéines ou inversement. Il couvrira par exemple convenablement les besoins en énergie mais pas ceux en protéines. Dans ce cas il faut ajouter un deuxième voir un troisième aliment tout en diminuant éventuellement la quantité du premier pour éviter un excès en énergie ou en protéines. Ce mélange d'aliment qui constitue une ration, ne se fait pas au hasard, il doit se calculer. C'est ce que désigne l'expression « **équilibrer une ration alimentaire** » tel que présenté dans l'exemple ci après.

1. Rappel des caractéristiques de la vache type

Soit à calcule une ration pour un troupeau de 20 vaches laitières dont on a défini précédemment la vache type qui le représente :

- Vache multipare âgée de 40 mois en 5ème semaine de gestation
- Production laitière type : 27 kg avec TB = 36 g/kg et TP = 30 g/kg
- Poids : 600 kg
- Note d'état : 2,5
- Semaines de lactation : 17

On considère les animaux dans une stabulation plus ou moins libre donc plus ou moins capables de quelques déplacements. Eléments à prendre en compte dans les besoins en énergie d'entretien.

Figure XIV.1. Type de stabulation courant dans les étables algériennes

2. Données sur les aliments disponibles

On suppose que la ferme dispose d'un fourrage à base d'**ensilage de vesce-avoine** et de **l'orge en grain présentant les** valeurs alimentaires suivantes :

		% MS	/kg MS		g/kg MS			
			UEL	UFL	PDIN	PDIE	Ca_{abs}	P_{abs}
F	Ensilage de vesce-avoine	35,6	1,08	0,77	80	64	4,5	1,9
C_1	Orge en grain	86,7	--	1,09	79	101	0,5	3,0

3. Calcul de la capacité d'ingestion journalière (CI)

La capacité d'ingestion de la vache laitière se calcule par référence à l'annexe A3 « calcul de la capacité d'ingestion d'une vache laitière » (dont extrait ci-dessous) et se mesure en UEL (unité d'encombrement lait). Elle nécessite la connaissance du poids de la vache, sa production type, sa note d'état, ses stades de lactation et de gestation et son âge.

	Effets principaux			Correctifs multiplicatifs		
	Poids	Production laitière type	Note d'état	Lactation (semaines)	Gestation (semaines)	Age
Caractéristiques	600 kg	27 kg/j	2,5	17	5	40
Indices	13,9	4,05*	0,75	0,98	1	0,96

***** Cet indice est calculé par extrapolation de l'indice 3,75 (relevé sur l'annexe A3) pour une production de 25 kg soit : (27/25) x 3,75 = 4,05

CI = (13,9 + 4,05 + 0,75) x (0,98 x 1 x 0,96) = **17,6 UEL/j**

4. Calcul des besoins journaliers en énergie, protéines et minéraux

Le calcul des besoins journaliers se fait en utilisant l'annexe A1 pour une vache pesant 600 kg, produisant 27 kg de lait avec TB = 36 g/kg et TP = 30 g/kg en 5ème semaine de gestation et en stabulation libre.

Besoins	UFL	PDI (g/j)	Ca_{abs} (g/j)	P_{abs} (g/j)
Entretien	5,5	395	15,4	14,5
Production lait	11,0*	1266*	33,8*	24,3*
Gestation	0	0	0	0
Total	**16,5**	**1661**	**49,2**	**38,8**

***** Calculé également par extrapolation comme dans le calcul de la CI.

5. Vérifier si la ration alimentaire couvre les besoins en énergie de la vache

Il est toujours conseillé de maximiser la part du fourrage dans la ration afin de minimiser les coûts d'alimentation (prix élevés des concentrés) et veiller à la santé de la vache (acidose). Dans une première approche, il faut vérifier si l'utilisation du fourrage seul peut couvrir les besoins en énergie de la vache. Pour cela, il existe deux méthodes.

- Vérification par comparaison des besoins en UF de la vache et des apports en UF du fourrage s'il est distribué seul.
- Vérification par comparaisons de la densité énergétique du fourrage par rapport à celle de la ration.

5.1. Vérification par comparaison des besoins et des apports

On calcule la quantité[110] de fourrage (QF) qui sera ingérée volontairement par la vache en divisant sa capacité d'ingestion (CI = 17,6 UEL) par la valeur d'encombrement du fourrage (VEF = 1,08).

QF (kg MS) = CI (UEL) / VEF (UEL/kg MS) = 17,6/1,08 = **16,3 kg MS**

qui apporteront une énergie totale de :

16,3 x 0,77 UFL/kg MS = **12,5 UFL**

Cet apport est inférieur aux besoins de la vache qui sont de **16,5 UFL**. Le fourrage distribué seul n'apporte donc pas assez d'énergie, même distribué à volonté. Il est inutile d'aller plus loin, la ration n'est pas équilibrée et il faudra rajouter alors un ou des concentrés et recalculer les nouvelles quantités de fourrage et de concentré à apporter.

[110]. Selon la formule $MSVI = \frac{CI}{VEF}$ vue au chapitre VIII. Notez bien que toutes les quantités sont calculées en matière sèche (MS).

5.2. Vérification par comparaison des densités énergétiques

Il s'agit de comparer la densité énergétique du fourrage : **DEF = UFL_F /VEF** avec la densité énergétique minimale de la ration : **DERm = UFL_V/CI** (chapitre IX).

- Si DEF≥ DERm, le fourrage peut à lui seul suffire à combler les besoins énergétiques de l'animal. La quantité de fourrage à distribuer se calcule alors comme dans la méthode précédente par l'équation (QF kg MS = CI/VEF) ou en divisant les besoins UF de la vache par la valeur UF du fourrage (QF kg MS = UFL_V/UFL_F).
- Si DEF<DERm, le fourrage même distribué à volonté ne peut à lui seul couvrir les besoins énergétiques de l'animal. Il faut apporter un concentré et calculer la part du fourrage et du concentré dans la ration.

Dans le cas présent :

$$DEF = UFL_F/VEF = 0{,}77/1{,}08 = \mathbf{0{,}71}$$
$$DERm = UFL_V/CI = 16{,}5/17{,}6 = \mathbf{0{,}94}$$

En comparant DEF et DERm, on constate que **DEF** (0,71) **< DERm** (0,94). Le fourrage seul est donc insuffisant.

6. Calcul de la ration en ajoutant un concentré pour couvrir la totalité des besoins énergétiques

Il faut complémenter le fourrage en ajoutant un concentré et recalculer la ration pour évaluer la part de fourrage et de concentré qu'elle doit contenir. Nous devons donc établir la valeur de deux inconnues QF et QC_1 tel que

- QF = Quantité de fourrage (ensilage de vesce-avoine)
- QC_1 = Quantité de concentré C_1 qui est dans notre cas de l'orge en grain.

Comme nous ne connaissons à priori ni QF ni QC_1, cela revient, sur le plan mathématique, à résoudre un système de deux équations à deux inconnues (QF et QC_1).

6.1. Établissement du système d'équation

La première équation (1) est établie à partir de la connaissance du système des unités d'encombrement et la seconde (2), à partir des besoins en énergie de la vache. Elles permettent toutes deux d'exprimer les quantités **QF** et **QC_1** :

$$\begin{cases} CI = (\mathbf{QF} \times VEF) + (\mathbf{QC_1} \times VEC) & (1) \\ Bes\ UF = (\mathbf{QF} \times UF_F) + (\mathbf{QC_1} \times UF_{C1}) - E & (2) \end{cases}$$

Avec :

VEF = Valeur d'encombrement du fourrage
VEC = Valeur d'encombrement du concentré
UF_F = Valeur énergétique du fourrage
UF_{C1} = Valeur énergétique du concentré
E = Coefficient de correction énergétique qui se détermine avec l'annexe A4

6.1.1. Explication du coefficient de correction énergétique E

Lorsqu'on sert une ration composée de deux aliments (comme dans notre cas un fourrage et un concentré) ou plus, il a été démontré que la digestibilité de la ration globale devient inférieure à celle de la digestibilité de chacune de ses composantes si ces dernières sont servies séparément. On dit qu'il y a une interaction digestive entre les aliments. Selon les auteurs qui ont étudié ce phénomène, celui-ci résulte de la compétition entre les micro-organismes du rumen en présence de divers substrats (cellulose et amidon) ou d'inhibition de certains d'entre eux par les conditions physico-chimiques créées par l'un ou l'autre aliment. Ces phénomènes ont pour effet de réduire la valeur énergétique de la ration totale. Par exemple, la présence d'aliments concentrés modifie le pH du jus de rumen et l'activité des bactéries cellulolytiques (qui dégradent la cellulose du fourrage) s'en trouve perturbée. Pour tenir compte de ce phénomène dans le calcul de la ration alimentaire on majore les besoins énergétiques par un **coefficient de correction**

énergétique appelé **E** mesuré en UFL. L'équation (2) du système s'écrirait donc :

$$\text{Bes UF} + E = (\mathbf{QF} \times UF_F) + (\mathbf{QC_1} \times UF_{C1})$$

Par commodité de calcul, on écrit :

$$\text{Bes UF} = (\mathbf{QF} \times UF_F) + (\mathbf{QC_1} \times UF_{C1}) - E$$

Comment déterminer le coefficient de correction énergétique E : On calcule le coefficient de correction énergétique E avec les données de l'annexe A4.

Exemple : cas d'une ration calculée pour une vache multipare produisant 25 kg de lait avec un fourrage de 1,05 UEL et 0,80 UFL. Il suffit de localiser dans la première colonne du tableau le fourrage présentant 1,05 UEL puis dans la 2ème colonne la valeur fourragère correspondante à 0,80 UFL et lire la valeur de E dans la case qui se situe au croisement de cette ligne avec la colonne correspondant à une production de 25 kg de lait pour une vache multipare. Dans ce cas E = 0,70 UFL

Dans le cas de notre ration alimentaire, nous utilisons un ensilage de vesce-avoine de 1,08 UEL et 0,77 UFL pour une vache multipare produisant 27 kg de lait. Ces valeurs ne sont pas mentionnées dans l'annexe A4, il faut alors extrapoler la valeur de E à partir des valeurs proches.

Fourrage		Production laitière type									
		Primipares					Multipares				
Valeur UEL	Valeur UFL	15	20	25	30	35	20	25	30	35	40
	1,00	0,06	0,19	0,67	1,23	1,77	0,16	0,25	0,53	0,97	1,44
	0,95	0,06	0,31	0,85	1,41	1,93	0,16	0,30	0,68	1,13	1,60
1,05	**0,90**	0,07	0,46	1,03	1,58		0,16	0,41	0,84	1,30	1,76
	0,85	0,14	0,63	1,21	1,75		0,20	0,55	1,00	1,47	1,92
	0,80	0,26	0,81	1,39	1,89		0,29	**0,70**	1,17	1,63	
	0,75	0,40	0,99	1,56			0,42	**0,86**	1,33	1,79	
	0,95	0,07	0,48	1,09	1,67		0,16	0,42	0,87	1,36	1,84
	0,90	0,13	0,66	1,27	1,83		0,19	0,56	1,04	1,53	2,00
1,10	**0,85**	0,25	0,84	1,45	1,95		0,28	0,72	1,21	1,69	
	0,80	0,40	1,03	1,61			0,41	**0,88**	1,38	1,85	
	0,75	0,57	1,21	1,74			0,56	**1,05**	1,54		
	0,70	0,76	1,39	1,87			0,72	1,22	1,71		

La valeur UEL de notre fourrage étant de 1,08 UEL, elle se situe entre les valeurs 1,05 et 1,10 et la valeur UFL de 0,77 est située entre 0,75 et 0,80. Dans ce cas on détermine E en calculant la moyenne correspondante à ces différentes valeurs pour une production laitière de 25 kg. Dans ce cas :

$$E_{moyenne} = (0{,}70 + 0{,}86 + 0{,}88 + 1{,}05)/4 = 0{,}87 \text{ UFL}$$

Mais comme cette moyenne correspond à une production de 25 kg de lait, il faut l'extrapoler à 27 kg comme on l'a fait précédemment dans le calcul de la CI ou celui des besoins, soit :

$$E = (27/25) \times 0{,}87 = \mathbf{0{,}94\ UFL}$$

6.1.2. Rappel sur le calcul du coefficient Sg

On a vu au chapitre VIII que le concentré a aussi une valeur d'encombrement (VEC) mais celle-ci est variable et dépend de la valeur de **Sg** (taux de substitution global) dans la formule :

$$\boxed{\mathbf{VEC = Sg \times VEF}}$$

On détermine le coefficient **Sg** à l'aide de l'annexe A2 selon d'une part la VEF et la teneur en énergie du fourrage associé au concentré et d'autre part l'état physiologique de la vache (primipare ou multipare) et sa production laitière. Dans notre cas, la ration alimentaire est calculée pour une vache laitière multipare et une production de lait de 27 kg/j. Elle est composée d'un ensilage de vesce-avoine (1,08 UEL et 0,77 UFL) associé à un concentré à base d'orge. Comme les valeurs de notre fourrage ne figurent pas dans l'annexe 2,

on procède comme pour le calcul de E par moyenne et extrapolation des valeurs proches.

Fourrage		Production laitière type									
		Primipares					Multipares				
Valeur UEL	Valeur UFL	15	20	25	30	35	20	25	30	35	40
	1,00	0,65	0,50	0,40	0,35	0,31	0,66	0,55	0,46	0,40	0,36
	0,95	0,59	0,45	0,38	0,33	0,31	0,61	0,50	**0,42**	0,38	0,34
1,05	**0,90**	0,53	0,42	0,36	0,32	0,30	0,55	0,46	0,40	0,36	0,33
	0,85	0,49	0,40	0,35	0,32	0,30	0,51	0,43	0,38	0,35	0,33
	0,80	0,45	0,38	0,34	0,32	0,30	0,47	**0,41**	0,37	0,34	0,32
	0,75	0,43	0,37	0,33	0,32	0,30	0,44	**0,39**	0,36	0,34	0,32
	0,95	0,54	0,42	0,35	0,31	0,29	0,56	0,46	0,39	0,35	0,32
	0,90	0,49	0,39	0,34	0,31	0,29	0,51	0,43	0,37	0,34	0,32
1,10	**0,85**	0,45	0,37	0,33	0,31	0,29	0,47	0,40	0,36	0,33	0,31
	0,80	0,43	0,36	0,32	0,31	0,29	0,44	**0,39**	0,35	0,33	0,31
	0,75	0,40	**0,35**	0,32	0,31	0,29	0,42	**0,37**	0,34	0,32	0,31
	0,70	0,39	0,35	0,32	0,31	0,30	0,40	0,37	0,34	0,32	0,31

$$Sg_{moyenne} = (0{,}41 + 0{,}39 + 0{,}39 + 0{,}37)/4 = 0{,}39$$

Pour une production de lait à 27 kg on exprime Sg par extrapolation tel que :

$$Sg = (27/25) \times 0{,}39 = \mathbf{0{,}42}$$

Ce qui veut dire que pour chaque kilogramme de concentré consommé, la vache ingère 420 g de MS de moins de fourrage.

6.2. Résolution du système d'équation

Comme VEC = Sg x VEF, l'équation (1) ci-dessus peut s'écrire :

$$CI = (QF \times VEF) + (QC_1 \times Sg \times VEF) = VEF \times [QF + (QC_1 \times Sg)]$$

El le système d'équation devient :

$$\begin{cases} CI = VEF \times [QF + (QC_1 \times Sg)] & (3) \\ Bes\ UF = (QF \times UF_F) + (QC_1 \times UF_{C1}) - E & (4) \end{cases}$$

La résolution de ce système d'équation à deux inconnues permet de calculer les quantités de concentrés (QC_1) et de fourrages (QF) qui doivent être consommées par la vache pour combler ses besoins en énergie. La formalisation mathématique de la résolution de ce système est exposée à l'annexe B3 pour le lecteur qui désire approfondir sa connaissance de la démarche théorique. Pour ne pas alourdir le texte, on donne directement les solutions ci-après.

$$\mathbf{QC_1} = \frac{(Bes\ UF + E) - (CI \times DEF)}{UF_{C1} - (Sg \times UF_F)} \qquad \mathbf{QF} = \frac{CI - (QC_1 \times Sg \times VEF)}{VEF}$$

Toutes les données sont connues, il suffit de remplacer chaque variable par sa valeur pour déduire les quantités de concentré (QC_1) et de fourrage (QF) nécessaires à la vache de notre cas.

- Bes UF = Besoin en UF de la vache = 16,5 UFL
- E = Coefficient de l'interaction digestive (Annexe A4) = 0,94 UFL
- CI = Capacité d'ingestion = 17,6 UEL
- DEF = Densité énergétique du fourrage = 0,71
- UF_{C1} = Valeur énergétique du concentré = 1,09 UFL
- Sg = Taux de substitution (Annexe A2) = 0,42

- UF_F = Valeur énergétique du fourrage = 0,77
- VEF = Valeur d'encombrement du fourrage = 1,08

Le calcul de QC_1 (quantité de concentré) donne :

$$\mathbf{QC_1} = \frac{(\text{Bes UF} + \text{E}) - (\text{CI x DEF})}{\text{UF}_{C1} - (\text{Sg x UF}_F)} = \frac{(16{,}5 + 0{,}94) - (17{,}6 \text{ x } 0{,}71)}{1{,}09 - (0{,}42 \text{ x } 0{,}77)} = \frac{4{,}94}{0{,}77} = \mathbf{6{,}4\ kg}$$

Le calcul de QF (quantité de fourrage) donne :

$$\mathbf{QF} = \frac{\text{CI} - (\text{QC}_1 \text{ x Sg x VEF})}{\text{VEF}} = \frac{17{,}6 - (6{,}4 \text{ x } 0{,}42 \text{ x } 1{,}08)}{1{,}08} = \frac{14{,}7}{1{,}08} = \mathbf{13{,}6\ kg}$$

Il faut donc **13,6 kg de MS d'ensilage de vesce-avoine et 6,4 kg de MS d'orge** pour couvrir les besoins énergétique de la vache prise en exemple dans le présent cas. Il faut maintenant vérifier si cette ration, théoriquement satisfaisante au plan de la couverture énergétique, couvre les besoins protéiques de notre vache.

7. Vérification de l'équilibre de la ration en énergie

En comparant les apports et les besoins dans le tableau ci-après, on établit le bilan énergétique de la ration. Celui-ci affiche un solde nul, ce qui exprime un équilibre entre les besoins et les apports. La ration est donc équilibrée pour l'énergie et ne présente ni déficit ni excédent.

	kg MS	**UFL**	
		UFL/kg MS	**UFL total**
Ensilage de vesce-avoine (F)	13,6	0,77	10,5
Orge en grain (C_1)	6,4	1,09	7,0
Total apports UFL			**17,5**
Besoin de la vache			16,5
Coefficient de correction énergétique E			0,94
Total besoins UFL			**17,5**
Déficit ou excédent (Apports - Besoins)			**0,0**

8. Vérification de l'équilibre de la ration en protéines

Une ration bien équilibrée en protéines doit remplir deux conditions :

1ère condition : avoir des apports PDIE égaux aux besoins PDI de la vache tel que

Besoins PDI = Apports PDIE

L'apport PDIE de la ration doit donc satisfaire l'équation :

$$\mathbf{Besoin\ PDI = (QF \text{ x } PDIE_F) + (QC \text{ x } PDIE_C)}$$

2ème condition : avoir des apports PDIN égaux ou légèrement supérieurs aux apports PDIE tel que

PDIN ≥ PDIE

Qu'en est-il de notre ration dont nous avons calculé ci-dessus l'apport en énergie ?

- Besoins PDI = **1661 g**
- Apports PDIE = $(QF \text{ x } PDIE_F) + (QC_1 \text{ x } PDIE_{C1})$ = (13,6 x 64) + (6,4 x 101) = **1517 g PDIE**
- Apports PDIN = $(QF \text{ x } PDIN_F) + (QC_1 \text{ x } PDIN_{C1})$ = (13,6 x 80) + (6,4 x 79) = **1594 g PDIN**

On constate tout de suite un déficit (Déf) de 144 grammes en PDIE :

Déf PDIE = Bes PDI – Apports PDIE

Déf PDIE = 1661 – 1517 = **144 g PDIE**

La ration doit donc à nouveau être réajustée de manière à équilibrer l'apport et les besoins en protéines tout en conservant l'équilibre de l'énergie. Pour cela, il faut substituer une partie de l'orge (désigné C_1) par un

concentré (C_2) plus riche en azote mais avec une valeur énergétique peu différente pour continuer à respecter l'équilibre de la ration.

Scénario fictif : on imagine que pas loin de cette ferme, il y a une brasserie qui produit des drêches d'orge déshydratées vendues comme aliment de bétail. Aussi, pour ne pas utiliser du tourteau de soja ou autre concentré importés qui coûtent trop chers, on porte notre choix sur ces drêches d'orge de brasserie (C_2) produites localement.

		% MS	/kg MS		g/kg MS			
			UEL	UFL	PDIN	PDIE	Ca_{abs}	P_{abs}
C_2	Drêches d'orge de brasserie	91,9	--	0,82	194	171	1,3	4,9

Notez bien que le calcul de l'apport du second aliment concentré C_2 (drêches d'orge de brasserie), est en complément du premier aliment C_1 (orge) et non en remplacement. Il s'agit de substituer une partie seulement de l'orge (C_1) par des drêches (C_2), de manière à ce que la somme C des quantités des deux concentrés C_1 et C_2 remplisse la condition :

$$\mathbf{QC = QC_1 + QC_2 = 6{,}4\ kg}$$

Cette condition est nécessaire pour respecter l'équilibre énergétique de la ration.

9. Calcul de la ration en équilibrant les protéines

L'apport PDIE de la ration doit satisfaire l'équation (1ère condition) :

$$\mathbf{Besoin\ PDI = (QF \times PDIE_F) + (QC \times PDIE_C)}$$

Développons cette équation avec $QC = QC_1 + QC_2$:

$$\text{Besoin PDI} = (QF \times PDIE_F) + (QC_1 \times PDIE_{C1}) + (QC_2 \times PDIE_{C2})$$

$$\text{Besoin PDI} - (QF \times PDIE_F) = (QC_1 \times PDIE_{C1}) + (QC_2 \times PDIE_{C2})$$

Comme $QC_1 = QC - QC_2$, on peut écrire :

$$\text{Besoin PDI} - (QF \times PDIE_F) = [(QC - QC_2) \times PDIE_{C1}] + (QC_2 \times PDIE_{C2})$$

$$\text{Besoin PDI} - (QF \times PDIE_F) = (QC \times PDIE_{C1}) - (QC_2 \times PDIE_{C1}) + (QC_2 \times PDIE_{C2})$$

$$\text{Besoin PDI} - [(QF \times PDIE_F) + (QC \times PDIE_{C1})] = (QC_2 \times PDIE_{C2}) - (QC_2 \times PDIE_{C1})$$

$$\text{Besoin PDI} - [(QF \times PDIE_F) + (QC \times PDIE_{C1})] = QC_2 \times (PDIE_{C2} - PDIE_{C1})$$

$$QC_2 = \frac{\text{Besoin PDI} - [(QF \times PDIE_f) + (QC \times PDIE_{c1})]}{PDIE_{C2} - PDIE_{C1}}$$

Ce qui revient à écrire :

$$\boxed{\mathbf{QC_2 = \frac{Besoin\ PDI - Apports\ PDIE}{PDIE_{C2} - PDIE_{C1}} = \frac{Déficit\ PDIE}{PDIE_{C2} - PDIE_{C1}}}}$$

Et

$$\boxed{\mathbf{QC_1 = QC - QC_2}}$$

Toutes les données sont connues, il suffit de remplacer chaque variable par sa valeur pour déduire les quantités de concentré QC2 (drêches de brasserie) et QC1 (orge) nécessaires à l'équilibre de la ration au plan des protéines.

- Déficit PDIE = 144 g
- $PDIE_{c2}$ = 171 g
- $PDIE_{c1}$ = 101 g

$$\mathbf{QC_2} = \frac{\text{Déficit PDIE}}{PDIE_{C2} - PDIE_{C1}} = \frac{144}{171 - 101} = \frac{144}{70} = \mathbf{2{,}0\ kg}$$

$$\mathbf{QC_1} = QC - QC_2 = 6{,}4 - 2{,}0 = \mathbf{4{,}4\ kg}$$

Constitution de la ration finale (en matière sèche) :

Ensilage de vesce-avoine : **13,6 kg**, orge : **4.4 kg**, drêches de brasserie : **2,0 kg**

10. Vérification de l'équilibre de la ration finale

- Les apports des UFL et des PDIE couvrent les besoins avec un très léger déficit acceptable.
- La condition PDIN ⩾ PDIE est réalisée.

	kg MS	UFL		PDIN		PDIE	
		UFL/kg MS	UFL total	g/kg MS	g total	g/kg MS	g total
Ensilage de vesce-avoine	13,6	0,77	10,5	80	1088	64	870
Orge en grain	4,4	1,09	4,8	79	348	101	444
Drêches d'orge de brasserie déshydratées	2,0	0,82	1,7	194	388	171	342
Total apports			17,0		1824		1656
Total besoins			17,4				1661
Déficit ou excédent (Apports - Besoins)			**-0,4**		**165**		**- 5**

La question qui reste à vérifier est : s'il y a équilibre entre les protéines et l'énergie.

11. Calcul du Rmic pour vérifier le bon fonctionnement du rumen permis par la ration et l'équilibre entre protéines et énergie

Une fois la ration équilibrée au plan des besoins et des apports, il faut vérifier aussi si elle présente un rapport équilibré entre protéines et énergie. On considère une ration bien équilibrée de ce point de vue si elle contient environ 100 g de PDI/UFL et si sa différence entre PDIN et PDIE n'est pas loin de zéro.

Il faut, en règle générale apporter autant de PDIE que de PDIN car un déficit de ce dernier entraîne une baisse de l'activité microbienne dans le rumen. Dans la pratique cette égalité n'est pas toujours possible à réaliser et on peut accepter si le cas survient un léger déficit en PDIN car l'apport de l'urée par la salive (chapitre IV) augmente un peu les PDIN du rumen, ce qui permet un léger déficit en PDIN alimentaires. Pour intégrer tous ces paramètres on évalue l'équilibre de la ration par le rapport **Rmic** appelé rapport microbien tel que :

$$\mathbf{Rmic = (PDIN - PDIE) / UFL}$$

Les seuils acceptables de ce ratio, appelés seuil PDI sont définis dans les tables INRA 2007 comme suit :

Niveau de production lait (kg/j)	< 25	25 - 35	> 35
Seuil PDI	- 8	- 4	0

La ration est considérée acceptable si Rmic de la ration > au seuil PDI pour un niveau donné de production laitière sans trop le dépasser. Si le dépassement est trop élevé, il y a perte de l'azote dans les urines et donc perte économique. Si par contre Rmic de la ration < au seuil PDI il faut envisager un apport d'azote supplémentaire sous forme d'urée ou recalculer la ration en changeant de concentré. Dans notre cas :

$$\mathbf{Rmic} = \frac{(\mathbf{PDIN} - \mathbf{PDIE})}{\mathbf{UFL}} = \frac{(\mathbf{1824} - \mathbf{1656})}{\mathbf{17}} = \mathbf{9{,}8}$$

La valeur Rmic (9,8) calculée est supérieure au seuil PDI admis (-4) pour une production laitière type de 27 kg. La ration est donc acceptable. Elle permet une synthèse des protéines microbiennes optimale et une bonne digestibilité de la ration.

12. Vérification de l'équilibre de la ration en minéraux

	kg MS	Ca_{abs} (g/j)		P_{abs} (g/j)	
		g/kg MS	g total	g/kg MS	g total
Ensilage de vesce-avoine	13,6	4,5	61,2	1,9	25,8
Orge en grain	4,4	0,5	2,2	3,0	13,2
Drêches d'orge de brasserie	2,0	1,3	2,6	4,9	9,8
Total apports			**66**		**48,8**
Total besoins			**49,2**		**38,8**
Déficit ou excédent (Apports - Besoins)			**16,8**		**10**

La ration présente un léger excédent en calcium et en phosphore qu'on peut accepter.

CHAPITRE XX : Epilogue de «l'histoire de aami Lakhdar» ou comment équilibrer une ration en production laitière avec de la mélasse de canne et de l'urée.

Est-ce possible et dans quelles proportions ?

Oui de la mélasse et de l'urée !

Pour la mélasse, elle serait un produit courant en Algérie car générée abondamment par l'industrie du sucre, si malheureusement elle n'était pas « réexportée ». Certaines entreprises comme CEVITAL et BERRAHAL group, se sont spécialisées dans la production du sucre depuis le début des années 2000 dont une partie est écoulée sur le marché national et le reste exporté. C'est bien ! Maintenant comment est produit ce sucre et quel est le ou les coproduits (chapitre I) générés par cette industrie.

1. La mélasse, sous-produit de la cristallisation du sucre

Le sucre est obtenu par la transformation soit de la canne à sucre dans les pays des régions tropicales (Cuba, Brésil …) soit de la betterave sucrière, plus facilement cultivable dans les autres régions du monde. Cette culture encore peu ou pas développée en Algérie est plus en vogue chez nos voisins marocains avec laquelle ils couvrent près de 50% de leurs besoins en sucre.

L'extraction du sucre se fait en plusieurs étapes. On commence d'abord par extraire le jus sucré de la canne (par broyage et pressage) ou de la betterave (par diffusion dans de l'eau chauffée à 70°C) qu'on sépare ensuite par filtration en deux composés : un jus clair et un résidu boueux. Le résidu boueux est évacué et utilisé comme engrais et le jus clair épuré par chaulage est concentré par évaporation à 70% de matière sèche pour en faire un sirop. Celui-ci est ensuite transformé par divers procédés en un produit appelé «**masse cuite**» constitué de sirop ayant été amené à un seuil de sursaturation (état où le sucre ne peut plus se dissoudre). Cette masse cuite est de couleur brune et son état de sursaturation est nécessaire pour faire cristalliser le sucre. On extrait ensuite le sucre de la masse cuite par cristallisation et essorage successifs jusqu'à épuisement des cristaux contenus dans la masse cuite. On obtient alors des cristaux de sucre blanc (que nous achetons à l'épicerie) et un résidu de « masse cuite » constitué de sucre non cristallisable et d'autres composés auxquels était liés le sucre dans son état non cristallisé. On appelle ce résidu : «**mélasse**». C'est un produit qui se présente sous une forme liquide et visqueuse à forte teneur en matière sèche, environ 70%.

Dans le processus complet de transformation de la canne à sucre ou de la betterave, on n'exploite pas que le produit final qui est le sucre blanc cristallisé mais aussi les produits intermédiaires qui sont autant de richesses valorisables.

- La bagasse qui résulte de la séparation du premier jus et de la canne est riche en cellulose et en lignine. Elle est valorisée en partie pour l'alimentation du bétail et le reste comme source d'énergie pour la raffinerie elle-même.
- La pulpe de betterave qui résulte également de la séparation du premier jus et de la betterave est riche en énergie digestible. Elle est valorisée dans l'alimentation des vaches laitières.
- Les boues et les résidus de chaulage issus de la filtration et de l'épuration (canne et betterave) sont utilisés comme fertilisants.
- La mélasse est utilisée principalement pour la fabrication du rhum dans les pays de l'Amérique latine, comme édulcorant dans l'agroalimentaire et comme aliment de bétail tant en Amérique latine que dans les autres régions du monde.

2. La mélasse et l'urée en Algérie

En Algérie, le sucre n'est pas produit par la transformation directe de la canne à sucre ou de la betterave puisque nous ne cultivons ni l'une ni l'autre. Nous importons la « **masse cuite** » c'est-à-dire du sucre brut non cristallisé, désigné également par l'expression « sucre roux brésilien » à laquelle nous appliquons la dernière phase de raffinage c'est-à-dire la cristallisation. Mais bien que nous ne réalisons pas le processus complet de production avec la génération de tous les coproduits et les valeurs ajoutées qui leurs sont rattachées, la cristallisation nous permet encore de générer de la « **mélasse** » à titre de coproduit.

La mélasse est valorisable comme aliment de bétail et son usage à ce titre est très courant dans les pays européens et ceux d'Amérique latine producteurs de sucre. Aussi, au lieu qu'elle ne soit exportée[111] comme c'est le cas actuellement, on gagnerait mieux à la valoriser dans l'alimentation du bétail. Elle pourrait constituer en mélange avec l'urée également très disponible en Algérie un complément alimentaire riche qui peut diminuer de manière significative, l'usage des concentrés importés, baisser les coûts de production du lait et améliorer les revenus des éleveurs (fig. XX.1et XX.2).

La mélasse, un aliment liquide

Conteneur et pompe de distribution d'aliments liquides

Figure XX.1 : La mélasse, un aliment liquide : formes de présentation et équipement de conservation et de distribution

Figure XX.2 : Distribution ou incorporation de la mélasse dans l'alimentation de la vache

[111]22 000 tonnes de mélasse ont été exportées en 2017 (BESSAOUD, O. et *al*, 2019. - Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie. [Rapport de recherche] CIHEAM-IAMM., pp.82. hal-02137632)

Figure XX.3 : Une même urée présentée différemment selon les réglementations d'étiquetage (à gauche en Algérie, à droite en Europe)

Figure XX.4 : Incorporation de l'urée dans le foin

3. Calcul d'une ration alimentaire à base de foin et de son de blé dur, complémentée par la mélasse et l'urée

Cet exemple montre comment il est possible d'équilibrer une ration alimentaire au moindre coût et sans recourir aux concentrés onéreux importés. Un foin d'herbe relativement pauvre (évoqué dans notre histoire fictive de aami Lakhdar) est complémenté par du son de blé dur, de la mélasse et de l'urée en respectant trois critères :

- la mélasse n'est pas un concentré, mais un complément alimentaire liquide. Elle n'a donc pas de valeur d'encombrement;
- la mélasse ne doit pas dépasser 15% de la matière sèche totale de la ration;
- l'urée ne doit pas dépasser 40 grammes par 100 kg de poids vif.

Les valeurs alimentaires de la mélasse et de l'urée (tables INRA 2007) sont mentionnées dans le tableau ci-après avec celles du foin et du son de blé. L'urée est disponible en Algérie sous forme d'engrais dosé à 46% d'azote et la mélasse devrait l'être aussi. Ce sont les mêmes produits que ceux utilisés en Europe. La seule différence est dans l'étiquetage. L'urée est désignée, pour des questions réglementaires, « Urée alimentaire » (fig. XX.3 et 4) et la mélasse est appelée « aliment liquide » pour des raisons de marketing. Les valeurs alimentaires sont identiques et s'appliquent indifféremment aux deux types de produit, qu'ils soient algériens ou européens.

		% MS	/kg MS		g/kg MS			
			UEL	UFL	PDIN	PDIE	Ca_{abs}	P_{abs}
F	Foin de prairie de montagne	86	1,15	0,70	49	73	1,4	1,2
C	Son de blé dur	86,6		0,92	107	87	0,9	8,0
M	Mélasse de canne	73,7		0,86	32	62	4,0	0,7
	Urée (par kg de produit brut)	98		0	1443	0	0	0

On considère que cette ration est calculée pour la même vache type que celle utilisée dans l'exemple du chapitre précédent et dont nous rappelons les caractéristiques.

- Vache multipare âgée de 40 mois en 5ème semaine de gestation
- Production laitière type : 27 kg avec TB = 36 g/kg et TP = 30 g/kg
- Poids : 600 kg
- Note d'état : 2,5
- Semaines de lactation : 17
- Capacité d'ingestion CI = 17,6 UEL/j
- Les besoins sont :

	UFL	PDI (g/j)	Ca_{abs} (g/j)	P_{abs} (g/j)
Besoins totaux	**16,5**	**1661**	**49,2**	**38,8**

Pour le foin et le concentré :

- le coefficient de correction énergétique E calculé avec l'annexe A4 est E = 1,42,
- le taux de substitution global Sg calculé avec l'annexe A2 est Sg = 0,39.

3.1. Vérifier si le foin couvre les besoins en énergie de la vache type

Quantité de foin qui peut être ingérée (kg MS)

QF = CI/UEL	
= 17,6/1,15 = 15,3 kg MS	**15,3**

Apport UFL par le fourrage

UFL = QF x UFL	
= 15,3 x 0,70 UFL/kg MS = 10,7 UFL	**10,7**

Besoin UFL de la vache :	**16,5**

Vérification par comparaison des apports et des besoins

Apport UFL par le fourrage (10,7) < Besoin UFL (16,5)
L'apport en énergie par le foin (10,7 UFL) est inférieur aux besoins de la vache (16,5 UFL). Le foin distribué seul n'apporte pas assez d'énergie, même distribué à volonté. Il ne peut pas donc combler à lui seul les besoins en UFL. Il faut ajouter un concentré.

Vérification par comparaison des densités énergétiques

	Formule	Calcul	**Résultat**
DEF : Densité énergétique du fourrage	UFL_f/VEF_f	0,70/1,15	**0,61**
DERm : Densité énergétique minimale de la ration	UFL_v/CI_v	16,5/17,6	**0,94**

Si DEF ≥ DERm : le foin suffit à combler les besoins énergétiques de l'animal
Si DEF < DERm : le foin ne suffit pas à couvrir les besoins énergétiques de l'animal.

DEF (0,63) < DERm (0,94) Le foin ne peut pas combler à lui seul les besoins en UFL. Il faut ajouter un concentré

3.2. Calcul de la ration en ajoutant du son de blé dur pour couvrir la totalité des besoins énergétiques

On effectue un premier calcul pour déterminer quelle quantité de son est nécessaire pour combler les besoins en énergie.

- E = Coefficient de l'interaction digestive (Annexe A4) = 1,5 UFL
- Sg = Taux de substitution (Annexe A2) = 0,38

Calcul de la quantité de son de blé dur QC

QC = (Bes UF + E) – (CI x DEF) / UF_C – (Sg x UF_f)	
= (16,5 + 1,5) – (17,6 x 0,61)/0,92 – (0,38 x 0,70) = 11,1 kg	**11,1**

Calcul de la quantité de fourrage QF

QF_f = CI – (QC x Sg x VEF)/VEF	
= 17,6 – (11,1 x 0,38 x 1,15)/1,15 = 11,1 kg	**11,1**

Vérification de l'équilibre énergétique de la ration

	Quantité kg MS	UFL	
		UFL/kg MS	UFL total
Foin de prairie de montagne (f)	11,1	0,70	7,7
Son de blé dur (C_1)	11,1	0,92	10,3
Total apports UFL			**18,0**
Besoin de la vache			16,5
Coefficient de correction énergétique E			1,5
Total besoins UFL			**18,0**
Déficit ou excédent (Apports - Besoins)			**0,0**

3.3. Substitution d'une partie du son de blé dur par de la mélasse

On remplace une partie du son par de la mélasse sans déséquilibrer l'énergie de la ration et sans que la quantité de mélasse ne dépasse 15% de la matière sèche totale de la ration qui est (11,1 + 11,1 = 22,2 kg).

Quantité maximum de mélasse (QM) à rajouter :

QM = 22,2 x 0,15 = 3,33 kg

Sachant que la mélasse à une teneur en énergie de 0,86 UFL, cette quantité QM apportera :

$$UFL_M = 3,33 \times 0,86 = 2,9 \text{ UFL}$$

Il faut donc réduire l'apport en énergie du son (UFL_C) par une teneur équivalente et la nouvelle énergie qui doit être apportée par le son devient

$$UFL_C = 10,3 \text{ UFL} - 2,9 \text{ UFL} = 7,4 \text{ UFL}$$

0n calcule alors la quantité de son qu'il faut garder en divisant ce nouvel apport (7,4 UFL) par la teneur en énergie du son

$$QC = 7,4 \text{ UFL}/0,92 = 8,0 \text{ kg}$$

Et on déduit la quantité de son à substituer (QCS) :

$$QCS = 11,1 – 8,0 = 3,1 \text{ kg}$$

Comme le son est un concentré, sa VEC (valeur d'encombrement du concentré) est fonction de celle du fourrage tel que VEC = Sg x VEF. Ici Sg = 0,38 veut dire que pour chaque kilogramme de concentré consommé la vache ingère 0,380 kg de moins de fourrage (chapitre VIII) et inversement si on diminue le concentré, l'ingestion du fourrage augmente de 0,380 kg pour chaque kg de concentré diminué. Il faut donc rajouter une quantité de fourrage supplémentaire (QFS) proportionnellement à la quantité du son diminuée en multipliant QCS par Sg.

$$QFS = QCS \times Sg = 3,1 \times 0,38 = 1,2 \text{ kg}$$

La nouvelle quantité de foin devient :

$$\mathbf{QF = 11,1 + 1,2 = 12,3 \text{ kg}}$$

Et la nouvelle ration devient alors :

Foin (QF) : 12,3 kg	Son (QC) : 8,0 kg	Mélasse (QM) : 3,3 kg

Comme on ne pèse pas le foin au gramme près, on arrondi les quantités dans la ration comme suit :

Foin (QF) : 12 kg	**Son (QC) : 7 kg**	**Mélasse (QM) : 4 kg**

Vérifions si la quantité de mélasse (QM) respecte le critère QM ≤ 15 % de la MS totale de la ration (MST)

$$\% \text{ QM} = (QM/MST) \times 100 = (4 / (12 + 7 + 4)) \times 100 = 4 / 23 \times 100 = 17 \%$$

La condition QM ≤ 15 % de la MS totale de la ration est assez bien respectée.

Vérification de l'équilibre énergétique de la nouvelle ration

	Quantité kg MS	UFL	
		UFL/kg MS	UFL total
Foin de prairie de montagne	12	0,70	8,4
Son de blé dur	7,0	0,92	6,4
Mélasse de canne	4,0	0,86	3,4
Total apports UFL			**18,2**
Besoin de la vache			16,5
Coefficient de correction énergétique E			1,5
Total besoins UFL			**18,0**
Déficit ou excédent (Apports - Besoins)			**0,2**

La ration est équilibrée avec un très léger excédent acceptable.

3.4. Vérification de l'équilibre de la ration en protéines

Pour être équilibrée en protéines, la ration doit remplir deux conditions.

1ère condition : avoir des apports PDIE égaux aux besoins PDI de la vache. Besoins PDI = Apports PDIE

$$\mathbf{Besoin\ PDI = (QF \times PDIE_F) + (QC \times PDIE_C) + (QM \times PDIE_M)}$$

2ème condition : avoir des apports PDIN égaux ou légèrement supérieurs aux apports PDIE tel que :

$$\mathbf{PDIN \geq PDIE}$$

Vérification :

Besoin de la vache en PDI = 1661

Apport des PDI par la ration

PDIE = (QF x $PDIE_F$) + (QC x $PDIE_C$) + (QM x $PDIE_M$)	
= (12 x 73) + (7 x 87) + (4 x 62) = 1733 g	**1733**

PDIN = (QF x $PDIN_F$) + (QC x $PDIN_C$) + (QM x $PDIN_M$)	
= (12 x 49) + (7 x 107) + (4 x 32) = 1465 g	**1465**

Bilan PDIE : si négatif = Déficit ; si positif = Excédent

Bilan PDIE = Apports PDIE - Bes PDI	
= 1733 – 1661 = 72 g PDIE	**72**

La première condition d'avoir des Besoins PDI = Apports PDIE est réalisée avec un léger excédent de 72 g qu'on accepte. Il faut maintenant vérifier si **PDIN ≥ PDIE**.

	kg MS	UFL		PDIN		PDIE	
		UFL/kg MS	UFL total	g/kg MS	g total	g/kg MS	g total
Foin de prairie de montagne	12	0,70	8,4	49	588	73	876
Son de blé dur	7	0,92	6,4	107	749	87	609
Mélasse de canne	4	0,86	3,4	32	128	62	248
Total apports			**18,2**		**1465**		**1733**
Total besoins (UFL et PDI)			**18,0**				**1661**
Déficit ou excédent (Apports - Besoins)			**0,2**				**72**

La 2ème condition : PDIN ≥ PDIE (avoir des apports PDIN égaux ou légèrement supérieurs aux apports PDIE) n'est pas réalisée. Il y a un déficit de 268 g de PDIN calculé comme suit :

PDIN – PDIE = 1465 – 1733 = – 268 g

3.5. Comblement du déficit en PDIN par de l'urée

On comble ce déficit par un apport d'urée. Toutefois cet apport ne doit pas dépasser 40g/100kg de poids vif. On peut apporter pour notre vache qui pèse 600 kg, une quantité maximale de :

(40g/100) x 600 = 240 g

Comme il y a 1443 g de PDIN dans un kilogramme de produit brut d'urée, la quantité nécessaire pour couvrir le déficit de 268 g PDIN de la ration est obtenu en divisant :

268 / 1443 = 0,186 kg = 186 grammes

Cette quantité ne dépasse pas le seuil maximum autorisé. On l'arrondi à 200 g (pour faciliter le pesage) et on revérifie l'équilibre de la ration après ce rajout.

	Quantité kg MS	UFL		PDIN		PDIE	
		UFL/kg MS	UFL total	g/kg MS	g total	g/kg MS	g total
Foin de prairie de montagne	12	0,70	8,4	49	588	73	876
Son de blé dur	7	0,92	6,4	107	749	87	609
Mélasse de canne	4	0,86	3,4	32	128	62	248
Urée	0,200	0,00	0,0	1443	288	0,0	0,0
Total apports			**18,2**		**1753**		**1746**
Total besoins (UFL et PDI)			**18,0**				**1661**
Déficit ou excédent (Apports - Besoins)			**0,2**				**85**

La condition PDIN ⩾ PDIE (avoir des apports PDIN égaux ou légèrement supérieurs aux apports PDIE) est réalisée.

3.6. Calcul du Rmic pour vérifier le bon fonctionnement du rumen permis par la ration et l'équilibre entre protéines et énergie

Il faut maintenant vérifier si l'équilibre entre les protéines et l'énergie est établi. C'est-à-dire vérifier s'il n'y aurait pas trop ou pas assez de protéines par rapport à l'énergie. On évalue cet équilibre de la ration par le calcul du rapport Rmic (rapport microbien) :

Rmic = (PDIN - PDIE) / UFL

Et on compare le Rmic de la ration aux seuils PDI de ce dernier :

Niveau de production lait (kg/j)	< 25	25 - 35	> 35
Seuil PDI	- 8	- 4	0

La ration est considérée acceptable si Rmic de la ration > au seuil PDI pour un niveau donné de production laitière sans trop le dépasser.

$$\text{Rmic} = \frac{(\text{PDIN} - \text{PDIE})}{\text{UFL}} = \frac{(1753 - 1746)}{18{,}2} = \frac{7}{18{,}5} = \mathbf{0{,}4}$$

La valeur Rmic calculée (0,4) est supérieure au seuil PDI admis (-4) pour une production laitière type de 27 kg. La ration est donc acceptable. Elle permet une synthèse des protéines microbiennes optimale et une bonne digestibilité de la ration. Une ration bien équilibrée doit contenir environ 100 g de PDI/UFL, ce qui est le cas ici.

3.7. Vérification de l'équilibre en minéraux

	Quantité kg MS	Ca_{abs} (g/j)		P_{abs} (g/j)	
		g/kg MS	g total	g/kg MS	g total
Foin de prairie de montagne	12,0	1,4	16,8	1,2	14,4
Son de blé dur	7	0,9	6,3	8,0	56
Mélasse de canne	4	4,0	16,0	0,7	2,8
Total apports			**27,1**		**73,2**
Total besoins			**49,2**		**38,8**
Déficit ou excédent (Apports - Besoins)			**- 22**		**34,4**

La ration présente un excédent en phosphore incompressible mais un déficit en calcium qu'il faut corriger. Il faut donc raisonner la complémentation minérale sur la base de cet élément. Il faut donc ajouter un

complément à base de calcium. On peut utiliser de **la craie**[112] **broyée** riche en carbonate de calcium facilement disponible en Algérie. **Celle-ci contient environ 37 % de calcium brute**. Pour calculer la quantité nécessaire il faut d'abord exprimer le déficit de Ca_{abs} (calcium absorbable) en Ca (calcium brut) pour faire correspondre dosage à la teneur du produit commercial. **On divise alors Ca_{abs} par le coefficient 0,40** (voir chapitre X).

	Ca
Déficit Ca_{abs} (Ca absorbables)	22
Coefficient de conversion	0,40
Ca commercial en g (Ca_{abs} / 0,40)	**55**

On calcule la quantité à distribuer de ce produit en divisant le déficit en Ca (55g) par la teneur en celui-ci (37 %) du supplément.

Quantité du supplément minéral à distribuer

Comme 100 g du supplément contiennent 37 g de Ca, on calcule la quantité nécessaire par une règle de trois :

(Déficit en Ca / teneur de l'aliment en Ca) x 100= (55/37) x 100 = 148,6 g ≈ **150 g**

Vérification du comblement du déficit (apport en Ca par 150 g de craie brute)

Ca = 150 x 37 % ≈ **55 g**

Le déficit en calcium absorbale (Ca_{abs}) a bien été comblé puisque :

Ca_{abs}= Ca x 40% = 55 x 40% = **22 g**

4. Epilogue de l'histoire de aami Lakhdar

Et voilà ! Maintenant notre brave aami Lakhdar connait la valeur alimentaire du foin de prairie de son petit coin de pays et même la ration alimentaire pour nourrir sans souci ses vaches laitières. Mais vous avez bien compris, le foin de aami Lakhdar … Il était bon, mais … Aami Lakhdar était un peu frustré quand il l'a appris mais il a très vite changé d'avis quand il a vu qu'avec du son de blé dur (récolté chez nous), un peu de mélasse et juste quelques grammes d'urée, son foin se transformait en « miel » !!! Vous auriez dû voir sa joie quand il a compris que plus jamais il ne toucherait à ces satanés concentrés importés qui le ruinaient. Il s'est même mis à calculer l'achat du troisième agneau pour la fête de son fils qui se marie bientôt. Comme par hasard ce jour là encore, le technicien lui rendait visite. Voyant le bonheur qui éclairait le visage de son hôte, il comprit vite qu'il y avait peut-être un lien avec le papier que ce dernier tenait dans sa main. Il se souvenait encore de l'état de déprime dans lequel fût plongé aami Lakhdar à l'époque où il reçut la fameuse analyse fourragère. Curieux il lui demanda de lui permettre d'y jeter un coup d'œil. Il scruta longuement le document tout en remuant les lèvres, comme s'il calculait mentalement. Resté quelques instants silencieux, il rendit la feuille à aami Lakhdar en s'exclamant «Ah si on pouvait faire une application informatique pour faire ces calculs en routine, j'en ferai tous les jours moi, des rations alimentaires à mes éleveurs !!!». Il se tut un instant encore et rêveur, il poursuivit « et si on se mettait encore à cultiver de la betterave pour faire notre sucre, du colza pour faire notre huile, à utiliser tous nos coproduits, les rebuts de datte, les grignons d'olive, le marc de raisin, les drêches de brasserie et cultiver sérieusement du triticale et du sorgho, de la féverole et du poids fourrager … il ne finit pas la phrase, la petite fille de aami Lakhdar arrivait avec un plateau où trônaient café et petits losanges aux dattes.

Le fils de aami Lakhdar se maria, vécut heureux dans la ferme avec son père, il eut beaucoup d'enfants, beaucoup de vaches et beaucoup de lait. Aami Lakhdar qui ne se souciait plus de l'avenir de son fils prit sa retraite. Il se promena longtemps dans la montagne pour conseiller ses voisins paysans et la coopérative du village qui s'est lancé dans la fabrication du fromage.

[112] La **craie** est une roche calcaire plus ou moins pure, d'origine sédimentaire fréquente sur le pourtour du bassin méditerranéen.

A N N E X E S A

Extraits de : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – Valeur des aliments
Tables INRA 2007, mises à jour 2010. Éditions Quae

ANNEXE A1

CALCUL DES BESOINS JOURNALIERS EN ENERGIE, PROTEINES ET MINERAUX POUR L'ENTRETIEN, LA PRODUCTION DE LAIT ET LA GESTATION D'UNE VACHE LAITIERE

Entretien =A	UFL				PDI (g)	MSI (kg/j)	Minéraux	
Poids vif (kg)	A1[a]	A2[b]	A3[c]		Toutes conditions		Ca_{abs}	P_{abs}
500	4,4	4,8	5,3		345	10	11,4	9,5
550	4,7	5,2	5,6		370	13	13,4	12,0
600	5,0	5,5	6,0		395	16	15,4	14,5
650	5,3	5,8	6,4		420	19	17,4	17,0
700	5,6	6,2	6,7		445	22	19,4	19,5
750	5,9	6,5	7,1		470	25	21,4	21,4

Production lait = B	TB (g/kg)					TP (g/kg)						
Lait (kg)	32	36	40	44	48	28	30	32	34	Lait (kg)		
10	3,9	4,1	4,4	4,7	4,9	418	469	500	531	10	12,5	9,0
15	5,8	6,2	6,6	7,0	7,4	656	703	750	797	15	18,8	13,5
20	7,7	8,3	8,8	9,3	9,9	875	938	1000	1063	20	25,0	18,0
25	9,7	10,3	11,0	11,7	12,3	1094	1172	1250	1328	25	31,3	22,5
30	11,6	12,4	13,2	14,0	14,8	1313	1406	1500	1594	30	37,5	27,0
35	13,6	14,5	15,4	16,3	17,2	1531	1641	1750	1859	35	43,8	31,5
40	15,5	16,5	17,6	18,7	19,7	1750	1875	2000	2125	40	50,0	36,0
45	17,4	18,6	19,8	21,0	22,2	1969	2109	2250	2391	45	56,3	40,5
50	19,4	20,7	22,0	23,3	24,6	2188	2344	2500	2656	50	62,5	45,0
55	21,3	22,7	24,2	25,7	27,1	2406	2578	2750	2922	55	68,8	49,5
60	23,2	24,8	26,4	28,0	29,6	2625	2813	3000	3188	60	75,0	54,0

Gestation = C	Poids veau (kg)				Poids veau (kg)					
Stade fin	35	45	55		35	45	55	Stade Fin		
6[e] mois	0,4	0,6	0,7		36	47	59	6[e] mois	1,9	1,5
7[e] mois	0,8	1,1	1,3		68	88	109	7[e] mois	3,8	2,8
8[e] mois	1,4	1,8	2,7		116	148	180	8[e] mois	6,7	4,2
9[e] mois	2,3	2,9	3,5		179	227	274	9[e] mois	9,7	5,3

A1[a] : peu de déplacements, A2[b] : stabulation libre, A3[c] : pâturage

MSI = Masse Sèche Ingérée

ANNEXE A2

VALEUR DU TAUX DE SUBTITUTION GLOBAL (Sg) EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES DES VACHES ET DES FOURRAGES POUR DES RATIONS PERMETTANT D'EQUILIBRER APPORTS ET BESOINS EN PLEINE LACTATION

Fourrage		Production de lait potentielle (kg/j)									
		Primipares					Multipares				
Valeur UEL	Valeur UFL	15	20	25	30	35	20	25	30	35	40
0,95	1,00	0,66	0,61	0,69	0,41	0,36	0,66	0,66	0,56	0,48	0,42
	0,95	0,66	0,55	0,45	0,38	0,35	0,66	0,60	0,51	0,44	0,40
	0,90	0,63	0,50	0,42	0,37	0,34	0,65	0,55	0,47	0,41	0,38
	0,85	0,57	0,46	0,40	0,36	0,33	0,59	0,50	0,44	0,40	0,36
	0,80	0,42	0,44	0,38	0,35	0,32	0,54	0,47	0,42	0,38	0,36
1,00	1,00	0,66	0,55	0,44	0,37	0,33	0,66	0,61	0,50	0,43	0,39
	0,95	0,64	0,50	0,41	0,36	0,32	0,66	0,55	0,46	0,41	0,37
	0,90	0,58	0,46	0,93	0,34	0,32	0,60	0,50	0,43	0,39	0,35
	0,85	0,53	0,43	0,37	0,33	0,31	0,55	0,46	0,41	0,37	0,34
	0,80	0,49	0,41	0,36	0,33	0,31	0,50	0,44	0,39	0,36	0,34
	0,75	0,46	0,39	0,35	0,32	0,31	0,47	0,42	0,38	0,35	0,33
1,05	1,00	0,65	0,50	0,40	0,35	0,31	0,66	0,55	0,46	0,40	0,36
	0,95	0,59	0,45	0,38	0,33	0,31	0,61	0,50	0,42	0,38	0,34
	0,90	0,53	0,42	0,36	0,32	0,30	0,55	0,46	0,40	0,36	0,33
	0,85	0,49	0,40	0,35	0,32	0,30	0,51	0,43	0,38	0,35	0,33
	0,80	0,45	0,38	0,34	0,32	0,30	0,47	0,41	0,37	0,34	0,32
	0,75	0,43	0,37	0,33	0,32	0,30	0,44	0,39	0,36	0,34	0,32
1,10	0,95	0,54	0,42	0,35	0,31	0,29	0,56	0,46	0,39	0,35	0,32
	0,90	0,49	0,39	0,34	0,31	0,29	0,51	0,43	0,37	0,34	0,32
	0,85	0,45	0,37	0,33	0,31	0,29	0,47	0,40	0,36	0,33	0,31
	0,80	0,43	0,36	0,32	0,31	0,29	0,44	0,39	0,35	0,33	0,31
	0,75	0,40	0,35	0,32	0,31	0,29	0,42	0,37	0,34	0,32	0,31
	0,70	0,39	0,35	0,32	0,31	0,30	0,40	0,37	0,34	0,32	0,31
1,15	0,95	0,49	0,39	0,33	0,30	0,28	0,51	0,42	0,37	0,33	0,31
	0,90	0,45	0,37	0,32	0,30	0,28	0,47	0,40	0,35	0,32	0,30
	0,85	0,42	0,35	0,32	0,30	0,28	0,44	0,38	0,34	0,32	0,30
	0,80	0,40	0,34	0,31	0,30	0,28	0,42	0,37	0,34	0,31	0,30
	0,75	0,38	0,34	0,31	0,30	0,29	0,40	0,36	0,33	0,31	0,30
	0,70	0,37	0,34	0,32	0,30	0,29	0,39	0,35	0,33	0,32	0,30
1,20	0,90	0,42	0,34	0,31	0,29	0,27	0,44	0,37	0,34	0,31	0,29
	0,85	0,40	0,33	0,31	0,29	0,28	0,41	0,36	0,33	0,31	0,29
	0,80	0,38	0,33	0,31	0,29	0,28	0,39	0,35	0,32	0,31	0,29
	0,75	0,36	0,33	0,31	0,29	0,28	0,38	0,34	0,32	0,31	0,29
	0,70	0,36	0,33	0,31	0,29	0,28	0,37	0,34	0,32	0,31	0,30
1,25	0,85	0,37	0,32	0,30	0,28	0,27	0,39	0,34	0,31	0,30	0,28
	0,80	0,36	0,32	0,30	0,28	0,27	0,37	0,34	0,31	0,30	0,29
	0,75	0,35	0,32	0,30	0,28	0,27	0,36	0,33	0,31	0,30	0,29
	0,70	0,35	0,32	0,30	0,29	0,28	0,36	0,33	0,31	0,30	0,29

ANNEXE A3

CALCUL DE LA CAPACITE D'INGESTION (CI en UEL) D'UNE VACHE LAITIERE

Facteurs à effets principaux						Facteurs de correctifs multiplicatifs						
Poids vif		Potentiel lait		Note d'état (réserves)		Lactation (en semaines)			Gestation (en semaines)		Age (en mois)	
kg	Indice	(kg / j)	Indice	Note	Indice	semaines	Primi	Multi	semaines	Indice	Mois	Indice
450	11,65	tarie	0	0,5	3,75	1	0,66	0,74	<30	1	20	0,78
500	12,4	5	0,75	1	3	2	0,71	0,78	30	0,98	24	0,84
550	13,15	10	1,5	1,5	2,25	3	0,75	0,81	31	0,98	28	0,88
600	13,9	15	2,25	2	1,5	4	0,79	0,84	32	0,97	32	0,91
650	14,65	20	3	2,5	0,75	6	0,85	0,89	33	0,97	36	0,94
700	15,4	25	3,75	3	0	8	0,89	0,92	34	0,96	40	0,96
750	16,15	30	4,5	3,5	-0,75	10	0,92	0,94	35	0,94	44	0,97
800	16,9	35	5,25	4	-1,5	12	0,94	0,96	36	0,93	48	0,98
		40	6	4,5	-2,25	14	0,96	0,97	37	0,91	52	0,98
		45	6,75	5	-3	16	0,97	0,98	38	0,88	56	0,99
		50	7,5			20	0,98	0,99	39	0,84	>60	1
		55	8,25			24	0,99	0,99	>40	0,80		
		60	9			>24	1	1				

ANNEXE A4

VALEUR DE LA CORRECTION ENERGETIQUE (E, en UFL) EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES DES VACHES ET DES FOURRAGES POUR DES RATIONS PERMETTANT D'EQUILIBRER APPORTS ET BESOINS EN PLEINE LACTATION

Fourrage		Production de lait potentielle (kg/j)									
		Primipares					Multipares				
Valeur UEL	Valeur UFL	15	20	25	30	35	20	25	30	35	40
0,95	**1,00**	0,06	0,14	0,30	0,73	1,22	0,16	0,25	0,37	0,60	0,98
	0,95	0,06	0,14	0,43	0,90	1,39	0,16	0,25	0,40	0,73	1,14
	0,90	0,06	0,18	0,58	1,07	1,56	0,16	0,25	0,50	0,88	1,30
	0,85	0,06	0,28	0,74	1,24	1,73	0,16	0,30	0,63	1,03	1,46
	0,80	0,08	0,42	0,91	1,41	1,89	0,16	0,40	0,77	1,19	1,62
1,00	**1,00**	0,06	0,14	0,46	0,97	1,49	0,16	0,25	0,41	0,77	1,20
	0,95	0,06	0,18	0,62	1,15	1,66	0,16	0,25	0,52	0,92	1,37
	0,90	0,06	0,29	0,79	1,32	1,83	0,16	0,30	0,65	1,08	1,53
	0,85	0,07	0,44	0,97	1,49	1,99	0,16	0,41	0,80	1,24	1,69
	0,80	0,14	0,60	1,14	1,67		0,20	0,54	0,96	1,41	1,85
	0,75	0,26	0,77	1,32	1,82		0,20	0,69	1,13	1,57	
1,05	**1,00**	0,06	0,19	0,67	1,23	1,77	0,16	0,25	0,53	0,97	1,44
	0,95	0,06	0,31	0,85	1,41	1,93	0,16	0,30	0,68	1,13	1,60
	0,90	0,07	0,46	1,03	1,58		0,16	0,41	0,84	1,30	1,76
	0,85	0,14	0,63	1,21	1,75		0,20	0,55	1,00	1,47	1,92
	0,80	0,26	0,81	1,39	1,89		0,29	0,70	1,17	1,63	
	0,75	0,40	0,99	1,56			0,42	0,86	1,33	1,79	
1,10	**0,95**	0,07	0,48	1,09	1,67		0,16	0,42	0,87	1,36	1,84
	0,90	0,13	0,66	1,27	1,83		0,19	0,56	1,04	1,53	2,00
	0,85	0,25	0,84	1,45	1,95		0,28	0,72	1,21	1,69	
	0,80	0,40	1,03	1,61			0,41	0,88	1,38	1,85	
	0,75	0,57	1,21	1,74			0,56	1,05	1,54		
	0,70	0,76	1,39	1,87			0,72	1,22	1,71		
1,15	**0,95**	0,12	0,69	1,34	1,89		0,18	0,57	1,08	1,59	2,08
	0,90	0,25	0,88	1,52	2,02		0,27	0,73	1,25	1,75	
	0,85	0,40	1,07	1,66			0,41	0,90	1,42	1,92	
	0,80	0,58	1,26	1,79			0,56	1,08	1,59		
	0,75	0,77	1,42	1,92			0,72	1,25	1,76		
	0,70	0,96	1,55	2,04			0,89	1,42	1,91		
1,20	**0,90**	0,40	1,11	1,71			0,40	0,93	1,47	1,98	
	0,85	0,58	1,31	1,84			0,56	1,10	1,64		
	0,80	0,78	1,45	1,96			0,72	1,28	1,80		
	0,75	0,97	1,58	2,09			0,90	1,45	1,94		
	0,70	1,16	1,71	2,21			1,08	1,63	2,07		
1,25	**0,85**	0,79	1,48	2,01			0,72	1,31	1,85		
	0,80	0,99	1,61	2,13			0,90	1,48	1,98		
	0,75	1,17	1,74	2,25			1,08	1,65	2,10		
	0,70	1,31	1,87				1,27	1,78			

A N N E X E S B

ANNEXE B1

ESTIMATION DU POIDS D'UNE VACHE PAR MESURE DU PÉRIMÈTRE THORACIQUE ET CORRESPONDANCE AVEC LE POIDS VIF[113]

Tour de poitrine	Poids vif	Tour de poitrine	Poids vif	Tour de poitrine	Poids vif	Tour de poitrine	Poids vif
66 cm	37 kg	110 cm	120 kg	154 cm	298 kg	198 cm	603 kg
68	38	112	126	156	309	200	619
70	39	114	132	158	321	202	636
72	41	116	138	160	332	204	653
74	43	118	145	162	344	206	670
76	45	120	152	164	356	208	687
78	48	122	159	166	368	210	703
80	51	124	166	168	381	212	720
82	54	126	173	170	394	214	737
84	57	128	180	172	407	216	754
86	61	130	188	174	420	218	771
88	65	132	196	176	434	220	787
90	69	134	204	178	448	222	804
92	73	136	212	180	463	224	820
94	77	138	221	182	477	226	835
96	82	140	230	184	492	228	851
98	87	142	239	186	507	230	866
100	92	144	248	188	523	232	880
102	97	146	258	190	538	234	894
104	103	148	267	192	554	236	908
106	108	150	278	194	570		
108	114	152	288	196	586		

Sources nord-américaines

[113]In P. FROMENT, 2007. Note d'état corporel et reproduction chez la vache laitière. Thèse pour le doctorat vétérinaire. Faculté de médecine de Créteil.

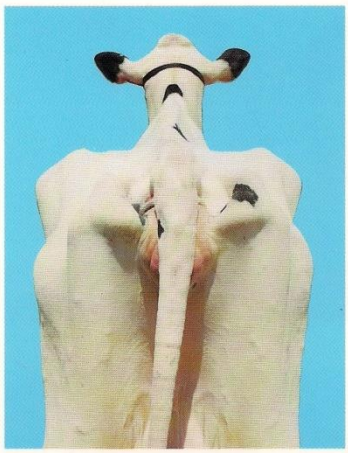
ANNEXE B2

L'OBSERVATION DE LA NOTE D'ETAT D'UNE VACHE

À tous points de vue…

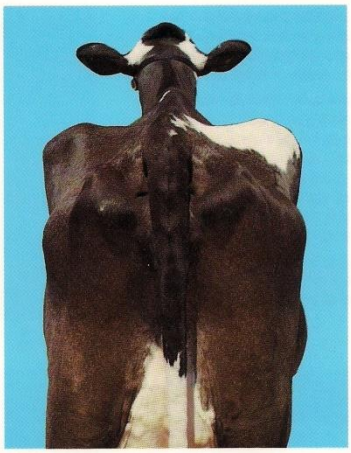
L'évaluation de la condition de chair

tient une place importante dans la régie de l'exploitation laitière moderne.



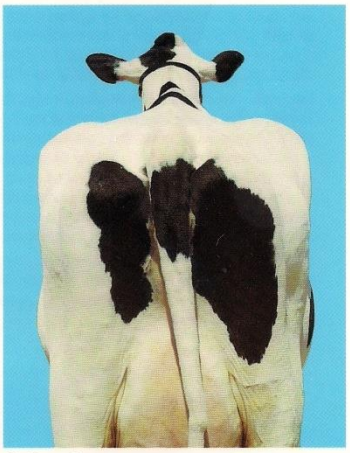
CC = 1

Cavité profonde à l'attache de queue. Ischions et côtes courtes saillants et faciles à localiser au toucher. Aucune trace de gras dans la région des ischions et des hanches. Dépression profonde entre les pointes des hanches et le rebord de l'épine dorsale.



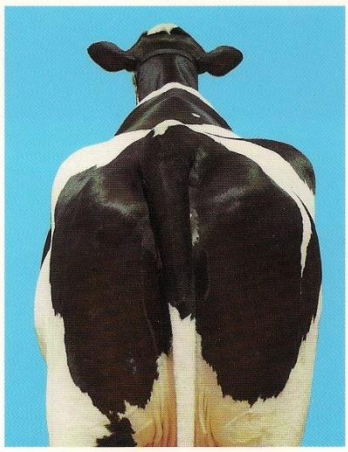
CC = 2

Cavité peu profonde à l'attache de queue, une légère couche de gras la recouvre ainsi que la pointe des hanches. Ischions faciles à localiser au toucher. Les extrémités des côtes courtes semblent arrondies au toucher et on peut sentir leur surface supérieure en exerçant une légère pression. Dépression visible entre les pointes des hanches et le rebord de l'épine dorsale.



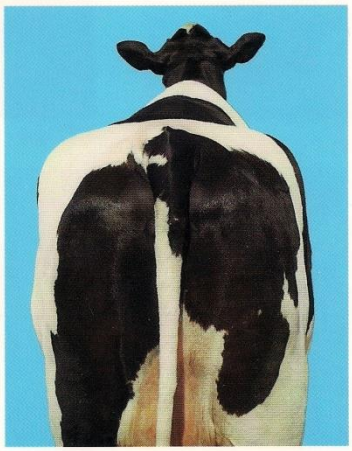
CC = 3

Aucune cavité à l'attache de queue. On sent facilement le tissu graisseux qui recouvre toute la région. Une légère pression permet de sentir les ischions. Une épaisse couche de gras couvre la surface supérieure des côtes courtes, que l'on peut sentir en exerçant une pression. Légère dépression entre les pointes des hanches et le rebord de l'épine dorsale.



CC = 4

Bourrelets à l'attache de queue et plaques de gras couvrant la pointe des hanches. Une pression ferme permet de sentir les ischions. Impossible de sentir les côtes courtes. Aucune dépression entre les pointes des hanches et le rebord de l'épine dorsale.



CC = 5

Attache de queue enfouie sous une épaisse couche de gras. Impossible de sentir les ischions, même en exerçant une pression ferme. Les côtes courtes sont recouvertes d'une épaisse couche de gras.

PROVEL MD

Produits de première qualité pour le médecin vétérinaire

► PROVEL
Division Eli Lilly Canada Inc.
6200, boul. Taschereau, bureau 304
Brossard, Québec J4W 1M7

Photos par Craig Johnson

ANNEXE B2 (suite)

L'OBSERVATION DE LA NOTE D'ETAT D'UNE VACHE

À tous points de vue…

L'évaluation de la condition de chair

PROVEL MD

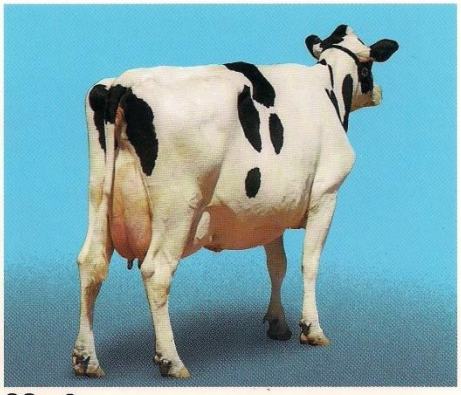
Produits de première qualité pour le médecin vétérinaire

tient une place importante dans la régie de l'exploitation laitière moderne.

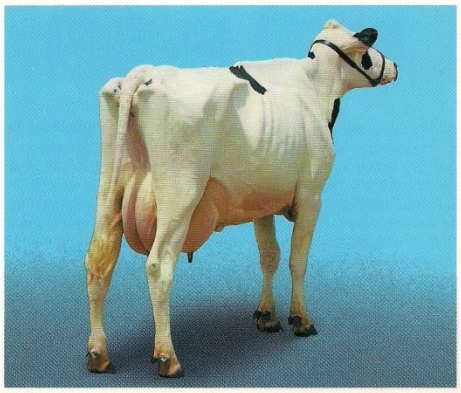
La condition de chair d'une vache laitière est un bon indicateur des réserves énergétiques disponibles et varie selon les différents stades de la lactation. Après le vêlage, les vaches, au pic de la lactation, ont tendance à avoir un bilan énergétique négatif et, par conséquent, leur condition de chair se détériore. Les vaches en fin de lactation, et les vaches taries ou celles qui produisent peu ont un bilan énergétique positif et une condition de chair qui va en s'améliorant. Il n'y a pas de condition de chair idéale. Il y a plutôt un ensemble de conditions désirables, qui varient selon l'animal et les différents stades de la lactation.

Les producteurs laitiers doivent évaluer régulièrement la condition de chair des vaches et des taures en vue d'optimiser leurs pratiques d'alimentation et leur régie. Des réserves suffisantes sont indispensables au maintien de la santé, de la production laitière et de l'efficacité de reproduction. Les vaches sans réserves suffisantes sont exposées à une diminution de leur production et à des difficultés à maintenir leur lactation. D'un autre côté, les vaches trop grasses sont prédisposées à des difficultés de vêlage, au syndrome de stéatose hépatique, aux problèmes de reproduction et à des troubles métaboliques.

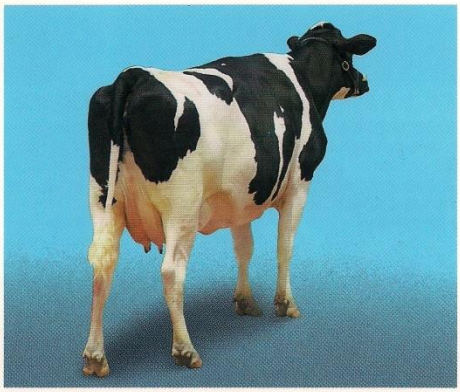
L'évaluation de la condition de chair des vaches est donc un outil de gestion essentiel pour le producteur de lait moderne. On peut maîtriser la technique avec de la pratique et de l'observation en utilisant la vue et le toucher pour évaluer chaque vache.



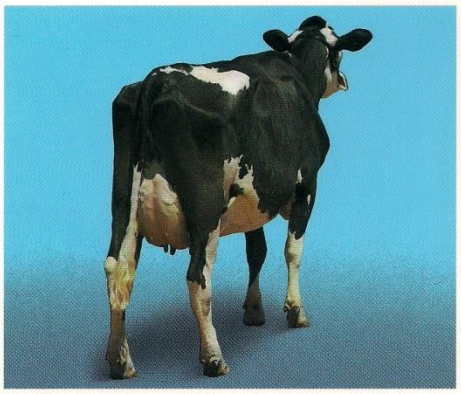
CC = 3



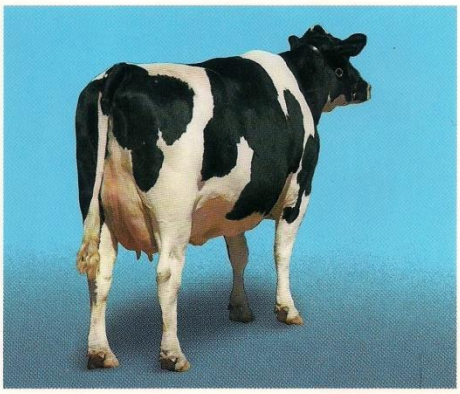
CC = 1



CC = 4



CC = 2



CC = 5

Photos par Craig Johnson

ANNEXE B3

Résolution mathématique de l'équation utilisée dans le chapitre XIX pour le calcul de la ration alimentaire

Il faut complémenter le fourrage en ajoutant un concentré et recalculer la ration pour évaluer la part de fourrage et de concentré qu'elle doit contenir. Nous devons donc établir la valeur de deux inconnues QF et QC tel que :

- QF = Quantité de fourrage
- QC = Quantité de concentré

Cela revient, sur le plan mathématique, à résoudre un système de deux équations à deux inconnues.

1.1. Établissement du système d'équation

La première équation est établie à partir de la connaissance du système des unités d'encombrement et la seconde, à partir des besoins en énergie de la vache qui permettent toutes deux de calculer les quantités à ingérer **QF** et **QC** :

$$\begin{cases} CI = (\mathbf{QF} \times VEF) + (\mathbf{QC} \times VEC) & (1) \\ Bes\ UF = (\mathbf{QF} \times UFf) + (\mathbf{QC} \times UFc) - E & (2) \end{cases}$$

Avec VEC = Sg x VEF, l'équation (1) s'écrit :
CI = (QF x VEF) + (QC x Sg x VEF) = VEF x [QF + (QC x Sg)]

El le système d'équation peut s'écrire :

$$\begin{cases} CI = VEF \times [\mathbf{QF} + (\mathbf{QC} \times Sg)] & (3) \\ Bes\ UF = (\mathbf{QF} \times UFf) + (\mathbf{QC} \times UFc) - E & (4) \end{cases}$$

A partir de l'équation (3) on extrait la valeur de QF :

CI = VEF x [QF + (QC x Sg)]

CI / VEF = QF + (QC x Sg)

QF = (CI/VEF) – (QC x Sg)

Et on remplace QF dans l'équation (4)

Bes UF = (QF x UFf) + (QC x UFc) – E

Bes UF + E = (QF x UFf) + (QC x UFc)

QF x UFf = (Bes UF + E) – (QC x UFc)

[(CI / VEF) – (QC x Sg)] x UFf = (Bes UF + E) – (QC x UFc)

(CI x UFf / VEF) – (QC x Sg x UFf) = (Bes UF + E) – (QC x UFc)

(QC x UFc) – (QC x Sg x UFf) = (Bes UF + E) – (CI x UFf / VEF)

On remplace le ratio UFf/VEF par sa valeur DEF et on met en facteur QC

QC [(UFc – (Sg x UFf)] = (Bes UF + E) – (CI x DEF)

QC = (Bes UF + E) – (CI x DEF) / UFc – (Sg x UFf)

Et nous retrouvons les deux expressions, présentées dans le texte

$$\boxed{\mathbf{QC} = \frac{(Bes\ UF + E) - (CI \times DEF)}{UFc - (Sg \times UFf)}} \qquad \boxed{\mathbf{QF} = \frac{CI}{VEF} - (QC \times Sg)}$$

EL-HADI BOUABDALLAH

ALGERIE : LA CRISE DU LAIT, LE FOURRAGE ET L'ALIMENTATION DE LA VACHE LAITIERE

« Penser l'agronomie d'abord, faire l'agriculture ensuite »

Si « Algérie » en ouverture du titre, risque de restreindre la perception du lecteur sur sa portée géographique, ce livre s'adresse aussi à tous les pays de la rive sud de la méditerranée qui partagent la même problématique agricole et nutritionnelle.

Entrez dans une librairie quelconque en Europe, la probabilité de trouver un titre sur ce sujet est très grande. Faites le même exercice en Algérie (ou ailleurs au Maghreb), la probabilité est à l'autre extrême. Et si par chance vous trouvez un livre sur ce sujet, la prairie est toujours verte, l'herbe abondante et la pluie généreuse en été. Pendant ce temps, dans nos champs secs écrasés par le soleil, nulle herbe ne pousse. Une littérature, quand elle existe, inadaptée.

Revenons au lait. L'Algérie en manque. Elle produit environ 15 % de ce qu'elle consomme, le reste est importé ; sous forme de poudre (1.4 milliards de Dollars en 2017) et de vache à traire localement. Mais plus l'importation de vaches augmente, plus celle de la poudre aussi. Le résultat aurait été l'inverse si bien sûr, le développement de la filière lait n'était pas aussi erratique. Des vaches dans des étables « ventilées » au Sahara et des éleveurs sur les montagnes bien arrosées de Kabylie, de Guelma ou Souk-Ahras en quête de fourrage pour les bêtes affamées. Résultats, des vaches qui produisaient 9000 litres de lait par an dans leurs pays d'origine n'en produisent que 3000 une fois installées au pays. A la question pourquoi ? On nous répond : « parce que nous n'avons pas de fourrage ».

En réalité, il n'y a pas que ce déficit, mais plusieurs facettes au problème : un manque de rationnement de la vache laitière découlant elle-même de la méconnaissance des valeurs alimentaires des fourrages cultivés ou spontanés. Ce livre, abondamment illustré en images et en exemples puisés dans notre contexte agricole tente de répondre à cette multitude de questions. Il n'existe pas de développement sans le savoir ni de savoir sans le vouloir de le développer. L'agriculture durable n'est pas une industrie de la mécanique. Sa technologie ne se transfère pas, elle s'acquiert au fil d'une longue expérience qui se doit sans rupture, pour croître d'une génération à l'autre.

Membre de l'Ordre des Agronomes du Québec, El-Hadi Bouabdallah cumule près de 35 ans d'expérience professionnel en recherche, service conseils et gestion de projet dans le développement agricole, en particulier dans les secteurs élevage, grande culture et conservation des sols, en Algérie, en France et au Canada. Il est titulaire d'un diplôme d'ingénieur agronome, spécialisé en agroéconomie, d'un DEA en biologie et d'un doctorat en agro-écologie portant sur les ressources fourragères des hautes-plaines sud-algéroises qui lui a été décerné par l'Université Paris XI. Il est également titulaire d'un DESS en Systèmes d'information géographique obtenu à l'UQAM (Université du Québec à Montréal)

Son implication professionnelle à titre de sous-directeur du Barrage vert et de directeur du département de la conservation des sols en Algérie et de conseiller en agroenvironnement ensuite au Canada, lui a conféré une grande expérience de terrain et dans les entreprises bovines, laitières et de boucherie. Ayant également œuvré dans le domaine de la recherche scientifique, il privilégie toujours des approches éco-systémiques, de manière à assurer une autosuffisance alimentaire à la ferme par une planification adéquate des besoins alimentaire des animaux et des objectifs assignés aux grandes cultures. Sensible au principe de durabilité de l'agriculture et au respect des équilibres écologiques, M. Bouabdallah a également développé une expertise importante dans les domaines de l'amélioration continue de la fertilité des sols.