

**Guide pour la prévision
de la valeur nutritive
des coproduits pour les ruminants**

Document rédigé par Patrick Chapoutot (AgroParis Tech), Marie-Catherine Leclerc (Institut de l'Elevage), Philippe Brunschwig (Institut de l'Elevage) et Pierrick Boulan (Chambre d'agriculture du Pas de Calais)

Les auteurs remercient Jacques AGABRIEL (INRA de Theix), Jacques LUCBERT et André LE GALL (Institut de l'Elevage) pour leur relecture de ce guide.

Ce document a bénéficié du soutien financier de l'ADEME.

Sommaire

Liste des abréviations	4
Préambule : le Comité National des Coproduits.....	5
1. Introduction.....	6
1.1. Objectifs	6
1.2. Public visé	6
2. Les informations disponibles relatives au coproduit à étudier	7
2.1. Description du process d'obtention du coproduit.....	7
2.2. Les questions à se poser concernant l'obtention du coproduit.....	7
3. Les analyses à mettre en oeuvre pour caractériser le coproduit.....	9
4. Réflexions sur le choix des modèles de prédiction de la valeur des coproduits	14
5. Principe général de calcul de la valeur nutritive des coproduits	18
5.1. Calcul de la valeur énergétique des coproduits	18
5.1.1. Principe général	18
5.1.2. Prédiction de la valeur énergétique par la méthode factorielle	19
5.1.2.1. Teneur en énergie brute	19
5.1.2.2. Estimation de la digestibilité de l'énergie brute.....	19
5.1.2.3. Transformation de l'énergie digestible en énergie métabolisable.....	22
5.1.2.4. Transformation de l'énergie métabolisable en énergie nette	22
5.1.2.5. Calcul de la valeur UFL et UFV	22
5.1.3. Prédiction directe des valeurs UFL et UFV des coproduits.....	22
5.1.3.1. Modèles établis sur un groupe de matières premières diverses	23
5.1.3.2. Modèles établis sur des matières premières de même famille.....	23
5.1.3.3. Modèles établis sur des aliments composés	27
5.2. Calcul de la valeur azotée d'un coproduit.....	29
5.2.1. Principe général	29
5.2.2. Prédiction des valeurs azotées par la méthode factorielle	30
5.2.2.1. Estimation de la dégradabilité théorique.....	30
5.2.2.2. Estimation de la digestibilité intestinale	31
5.2.2.3. Estimation de la matière organique fermentescible (MOF)	31
5.2.2.4. Calcul des valeurs PDIN et PDIE	32
5.2.3. Estimation directe des valeurs PDIN et PDIE des coproduits	32
5.2.3.1. À partir de la composition chimique.....	32
5.2.3.2. À partir de la composition chimique et de la DE1	34
5.2.4. Estimation des valeurs LysDI et MetDI des coproduits	35
5.3. Calcul de la valeur minérale des coproduits.....	35
5.4. Utilisation du logiciel Prévalim.....	38
6. Exemple de démarche de prédiction de la valeur nutritive sur un coproduit d'extraction issu du tourteau de tournesol	40
7. Conclusion	44
Annexe	45
Bibliographie	49

Liste des abréviations

AA : teneur en acide aminé (g/kg ou % de protéines brutes)
AADI : acides aminés digestibles dans l'intestin (g/kg ou % de protéines brutes)
ADF : acid détergent fiber (%)
ADL : acid detergent lignin (%)
BACA : bilan alimentaire cations-anions (mEq/kg MS)
BEA : bilan électrolytique alimentaire (mEq/kg MS)
NDF : neutral détergent fiber = ADF + hémicellulose (%)
Ca : calcium (g ou g / kg MS)
Ca_{abs} : calcium absorbable (g ou g/kg MS)
CAR : coefficient d'absorption réelle
CB : cellulose brute (%)
DcellMS : digestibilité pepsine-cellulase (% MS)
DcellMO : digestibilité pepsine-cellulase (% MO)
dE : digestibilité de l'énergie (%)
dE1 : dégradabilité enzymatique de l'azote (%)
dMO : digestibilité de la matière organique (%)
dr : digestibilité intestinale vraie chez les ruminants des protéines alimentaires non dégradées (%)
DT : dégradabilité théorique (de l'azote, de l'amidon ou de la matière sèche) (%)
EB : énergie brute (kcal / kg)
EC : pertes d'énergie par extra-chaueur (kcal / kg)
ED : énergie digestible (kcal / kg)
EE : extrait éthéré (%)
EF : pertes d'énergie d'origine fécale (kcal / kg)
EG : pertes d'énergie sous forme de gaz (kcal / kg)
EM : énergie métabolisable (kcal / kg)
EN : énergie nette (kcal / kg)
ET : écart type
ETR : écart type résiduel
EU : pertes d'énergie d'origine urinaire (kcal / kg)
IAA : industrie agro-alimentaire
MAD : matières azotées digestibles (%)
MAND : matières azotées non digestibles (%)
MANDE1 : matières azotées non dégradables par voie enzymatique (%)
MAT : matières azotées totales (%)
MG : matières grasses brutes (%)
MM : matières minérales (%)
MO : matière organique (%)
MOD : matière organique digestible (%)
MOF : matière organique fermentescible dans le rumen (g/kg)
MOND : matière organique non digestible (%)
MS : matière sèche
NDF : neutral detergent fiber (%)
P : phosphore (en g ou g / kg MS)
P_{abs} : phosphore absorbable (g ou g/kg de MS)
PDIA : protéines digestibles dans l'intestin qui proviennent des protéines alimentaires non dégradées dans le rumen (g/kg)
PDIM : protéines digestibles dans l'intestin qui proviennent des protéines vraies synthétisées par la population microbienne du rumen (g/kg)
PDIME : PDIM qui correspondent au potentiel de synthèse de l'aliment en énergie fermentescible dans le rumen (g/kg)
PDIMN : PDIM qui correspondent au potentiel de synthèse de l'aliment en azoté dégradé dans le rumen (g/kg)
PDIE : protéines réellement digestibles dans l'intestin permises par l'énergie = PDIA + PDIME (g/kg)
PDIN : protéines réellement digestibles dans l'intestin permises par l'azote = PDIA + PDIMN (g/kg)
PV : produits volatils
SP : sous-produits
UFL : unité fourragère lait (/ kg)
UFV : unité fourragère viande (/ kg)

Préambule : le Comité National des Coproduits

Les secteurs agricole et agro-alimentaire génèrent de nombreux coproduits dont certains peuvent trouver une utilisation toute naturelle en élevage, du fait de leurs réelles qualités nutritionnelles. Les éleveurs, sollicités pour les incorporer dans la ration de leurs animaux, manquent cependant souvent d'informations fiables pour les utiliser dans des conditions optimales.

C'est pour répondre aux questionnements des éleveurs et techniciens que le Comité National des Coproduits réalise, depuis 1982, des travaux et des études sur ces coproduits dans le but :

- de décrire leur processus de fabrication ;
- de définir leurs caractéristiques physico-chimiques et leurs valeurs alimentaires ;
- de conseiller des conditions de stockage adaptées à ces aliments souvent humides ;
- de proposer des recommandations de distribution de ces coproduits pour le rationnement des ruminants et des porcins.

Pour cela, le Comité National des Coproduits pratique des analyses en laboratoires et conduit des essais zootechniques. Il valide et transfère les informations recueillies sur les coproduits et rédige des documents techniques de synthèse. Il met au service des industriels son expérience et sa capacité d'expertise pour les accompagner dans leur démarche de valorisation de leurs coproduits *via* la filière « alimentation animale ».

Il bénéficie du soutien financier de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Animé par l'Institut de l'Elevage, ses membres proviennent d'horizons divers : Etablissements Départementaux d'Elevage et Chambres d'Agriculture, Ifip, INRA, Cemagref, Arvalis - Institut du Végétal, enseignement agricole (Institut Polytechnique LaSalle - Beauvais) et vétérinaire (ENV Maisons-Alfort), secteur agro-alimentaire fournisseur de coproduits, Association RESEDA.

1. Introduction

1.1. Objectifs

La connaissance de la valeur nutritive d'un aliment destiné aux animaux d'élevage est indispensable pour, d'une part, garantir une valorisation optimale de ce produit et veiller à l'équilibre et à l'innocuité de la ration totale, et d'autre part, permettre aux animaux de réaliser de bonnes performances zootechniques, en rapport avec les attentes de l'éleveur.

Lorsqu'il s'agit de matières premières connues (fourrages, céréales, tourteaux...), pour élaborer une ration, il est possible de se référer aux tables d'alimentation de l'INRA (INRA, 1988 ; Sauvart, Perez et Tran., 2004 ; INRA, 2007). Lorsqu'il s'agit d'aliments concentrés composés, les indications notées sur l'étiquette, relatives à la nature et la proportion des matières premières utilisées, peuvent également être utiles. Mais lorsqu'on se retrouve face à des coproduits d'industries agroalimentaires (IAA) non référencés dans les tables d'alimentation, la tâche devient plus délicate. Les informations concernant ces produits sont plus éparées, souvent incomplètes, voire même inexistantes pour certains. Le nombre de coproduits ne cesse cependant de croître, en rapport avec l'activité grandissante des IAA, et les quantités écoulées en élevages sont à présent loin d'être négligeables. Par ailleurs, les coproduits peuvent présenter une variabilité de composition chimique entre usines ou entre fabrications au sein d'une même usine.

C'est dans l'optique de pouvoir apporter une réponse à la question "Quelle valeur nutritive accorder à ce coproduit non référencé ?" que ce guide pour la prévision de la valeur nutritive des coproduits destinés aux ruminants a été rédigé.

L'objectif de ce guide est de proposer une démarche de réflexion autour de la prévision de la valeur nutritive d'un coproduit destiné aux ruminants.

L'expertise passe par la bonne connaissance du coproduit et de son process d'obtention ainsi que par une réflexion sur les différentes analyses à mettre en œuvre et sur le choix des modèles de prédiction.

Différentes possibilités d'estimation des valeurs énergétique, azotée et minérale des coproduits sont abordées ici, mais ce texte n'a pas pour vocation d'être totalement exhaustif à propos des équations disponibles pour l'ensemble des aliments.

De plus, les autres aspects de la qualité des coproduits, notamment leur qualité sanitaire (contaminations chimiques ou microbiennes...) et leur valeur hygiénique (risques de désordres digestifs ou métaboliques...), ne seront pas étudiés dans ce document.

1.2. Public visé

Ce document s'adresse notamment :

- aux responsables de laboratoires d'analyses chimiques ;
- aux agents (ingénieurs, vétérinaires, techniciens) des différentes structures de développement (Chambre d'Agriculture, EDE, Contrôle Laitier, Contrôle de Croissance...) ;
- aux fournisseurs de coproduits,

qui ont à attribuer une valeur nutritive à différents types de coproduits, dont certains peuvent ne pas être référencés dans les tables d'alimentation animale ni avoir déjà été étudiés par le Comité National des Coproduits.

2. Les informations disponibles relatives au coproduit à étudier

2.1. Description du process d'obtention du coproduit

La bonne connaissance du process d'obtention permettra de connaître *a priori* la nature des constituants majeurs du coproduit à étudier. En effet, il s'agira au final de bien identifier les fractions organiques et minérales qui restent dans le coproduit en fin de process afin d'orienter ce coproduit vers une voie de valorisation préférentielle : peut-il être valorisable en alimentation animale ? par quel type d'animal : ruminants ou monogastriques ?

2.2. Les questions à se poser concernant l'obtention du coproduit

La bonne connaissance de la nature du coproduit nécessite de se poser un certain nombre de questions sur les conditions d'obtention de cet aliment, sur la nature de la production agricole dont il est issu, sur les traitements subis et/ou les modalités de conservation et de stockage qu'il a subi.

La Figure 1 présente les principaux facteurs pouvant avoir une influence sur les caractéristiques nutritionnelles du coproduit à étudier.

Ainsi, sans que cette liste soit exhaustive, les réponses à un certain nombre de questions permettront de mieux appréhender la nature du coproduit à évaluer :

- sur la matière première :
 - Sur quelle(s) matière(s) première(s) initiale(s) s'applique le process : espèce(s) botanique(s), type d'organe(s) de la plante... ?
 - La matière première a-t-elle subi une modification de forme de présentation, un hachage, un aplatissement... ?
 - Quelle est la variabilité de la composition de la matière première initiale ?
- sur le process technologique :
 - Quelle filière industrielle est impliquée ? Quel produit final est recherché ?
 - Le coproduit est-il natif ou est-il un mélange de différentes fractions extraites ? Quelle est la nature et les proportions des différents éléments constituant le coproduit final ?
 - Quelles technologies sont appliquées ? S'il s'agit de l'extraction d'une fraction de réserve de la matière première, quelles modalités d'extraction ont été appliquées : pression mécanique, séparation par différence de densité, solubilisation, diffusion, distillation, procédé chimique... ? S'il s'agit d'une extraction chimique, est-ce par entraînement par une phase liquide, par des éléments chimiques (solvants...) ? Quelle est la nature des éléments chimiques utilisés ? À quel(s) moment(s) sont-ils utilisés dans le process ?
 - A l'occasion de la fabrication du coproduit, y a-t-il eu utilisation d'adjuvants ? De quelle nature ? A quelles doses ?
 - Quel est le rendement du process ? Y a-t-il un lien direct entre le rendement du process industriel et la qualité du coproduit ?
 - Quelle est la variabilité du process d'obtention (intra ou inter usine) ?
- sur les traitements secondaires :
 - Le coproduit est-il issu d'un process secondaire ? Le coproduit est-il généré par un traitement agro-industriel appliqué sur un coproduit issu d'un procédé primaire ? Quel(s) process primaire(s) ? Quel(s) process secondaire(s) ?
 - Le coproduit a-t-il subi un traitement particulier de présentation, de modification de la valeur nutritive, de conservation... ? Des procédés mécaniques ont-ils été utilisés (chauffage, surpressage, déshydratation...) ? Des procédés chimiques ont-ils été utilisés (adjuvants, conservateurs, ammoniac, soude...) ?

- sur les conditions de stockage du coproduit à l'usine :
 - Quels sont les modalités et délais de stockage du coproduit à l'usine ?
- sur les conditions de transport du coproduit :
 - Quels sont les conditions et délais de transport du coproduit ?
- sur les conditions de stockage dans l'élevage :
 - Quels sont les conditions de stockage et délais d'utilisation dans l'élevage ?

Il est important de rappeler que les modalités de prélèvements des échantillons peuvent conditionner fortement la validité des résultats des analyses appliquées au coproduit.

Il conviendra donc de mettre en œuvre les méthodes de prélèvement adéquates pour s'assurer de la bonne représentativité de l'échantillon envoyé au laboratoire (cf. annexe 1)

Par ailleurs, il faudra identifier précisément le « lieu » de prélèvement de l'échantillon à analyser dans la chaîne d'obtention du coproduit et d'associer à l'échantillon un commémoratif précis.

Définitions

Valeur nutritionnelle des aliments : concentration en éléments nutritifs de la matière sèche des aliments (valeur nutritionnelle énergétique, azotée, minérale...).

Valeur alimentaire des aliments : critère associant la valeur nutritionnelle et l'aptitude à être ingéré (estimée par la valeur d'encombrement) des aliments.

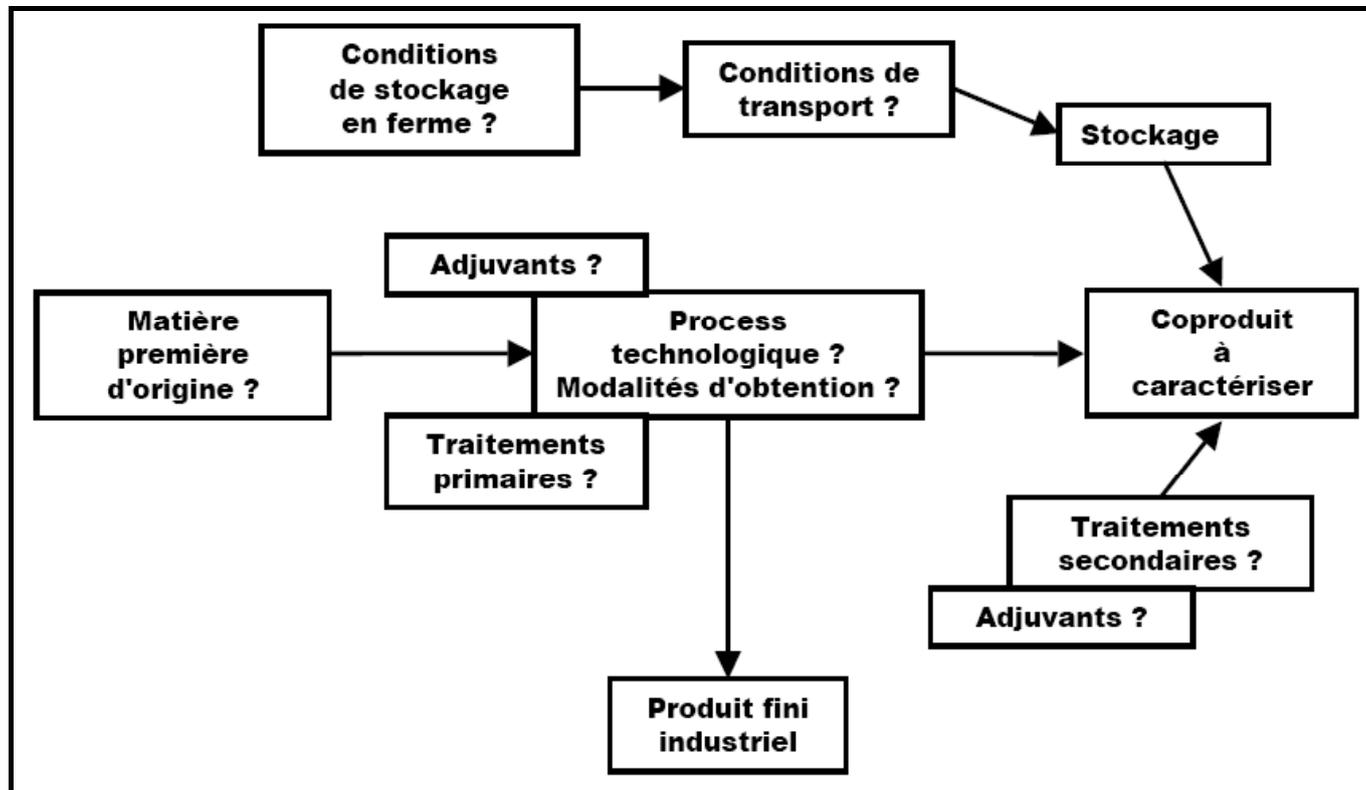


Figure 1 : les différents facteurs influençant les caractéristiques du coproduit à évaluer et sur lesquels il est nécessaire de s'interroger.

3. Les analyses à mettre en oeuvre pour caractériser le coproduit

L'estimation de la valeur nutritionnelle d'un aliment passe par la connaissance de sa composition chimique. L'analyse fourragère classique représente le minimum d'information nécessaire pour cette évaluation. Selon les cas, d'autres analyses concernant certaines fractions particulières peuvent permettre de mieux cerner la qualité d'un coproduit.

Ainsi, face à un coproduit, il est possible de mettre en oeuvre une démarche progressive de caractérisation croissante de sa composition en vue de l'estimation de sa valeur nutritive.

Plusieurs approches peuvent alors être mises en oeuvre :

- A - un raisonnement par analogie ou par déduction en l'absence de données chimiques ;
- B - les analyses chimiques minimales nécessaires ;
- C - les analyses chimiques complémentaires recommandées, adaptées au coproduit ;
- D - la mise en oeuvre de plans de contrôle permettant d'approcher la variabilité de composition du coproduit.

A. L'approche par analogie ou par déduction

En l'absence de données de composition chimique ou en présence d'une analyse incomplète, il est possible de chercher à rapprocher le coproduit étudié d'un ou plusieurs autres aliments ou coproduits déjà référencés, de la même famille ou d'un groupe d'aliments comparables, et dont les valeurs alimentaires sont connues dans les tables existantes. On procèdera alors par analogie avec le ou les aliments de référence pour estimer les valeurs les plus probables du coproduit étudié.

Si le coproduit correspond à un aliment destiné à la consommation humaine, il est également possible de s'inspirer des référentiels utilisés en alimentation humaine (ex. : CIQUAL¹ : Centre d'Information sur la Qualité des Aliments – Répertoire général des aliments avec tables de composition des aliments), de consulter une éventuelle étiquette (composition chimique, valeur énergétique...) puis de transposer ces informations dans le référentiel "alimentation animale".

Si le coproduit ne peut être rapproché d'aucun autre aliment déjà connu et caractérisé, une analyse chimique "pertinente" s'impose. Il convient dans ce cas de se reporter aux paragraphes suivants pour connaître les critères à analyser.

B. Les analyses chimiques minimales

La connaissance de la composition chimique des coproduits nécessite, avant toute analyse, de prélever un échantillon représentatif du lot à caractériser. Il est donc impératif de mettre en oeuvre les méthodologies d'échantillonnage adéquates, présentées en annexe 1.

Le minimum de connaissance de la composition chimique d'un coproduit repose sur la possibilité de quantifier la fraction minérale et les divers composants de la matière organique. L'analyse fourragère apporte une information minimale sur ces diverses fractions :

- Teneur en matière sèche (MS) par passage à l'étuve (avec d'éventuelles adaptations selon la nature du coproduit) ;
- Teneur en matières minérales (MM) par dosage des cendres brutes ;
- Teneur en matières azotées totales (MAT) par dosage de l'azote (N) par la méthode de Kjeldahl ou la méthode Dumas : $MAT = N \times 6.25$;

1 AFSSA/CIQUAL, 23 avenue du Gal de Gaulle, BP 19, 94701 Maisons-Alfort cedex, France

- Teneur en matières grasses (MG) par dosage de l'extrait éthéré (avec ou sans hydrolyse selon la nature du coproduit) ;
- Teneur en cellulose brute (CB) par la méthode de la Cellulose Weende.

Cette analyse minimale peut permettre d'approcher la valeur énergétique et azotée du coproduit (voir en partie 5 de ce document). La connaissance de la valeur minérale nécessite de compléter ces analyses par une évaluation de la teneur des principaux minéraux majeurs : calcium (Ca) et phosphore (P).

De plus, selon le type de modèle utilisé pour la prédiction de la valeur énergétique et azotée du coproduit (voir en partie 5 de ce document), il peut être nécessaire d'ajouter à ce "socle de base" des mesures supplémentaires de critères chimiques (ex. : teneur en lignine par la méthode de Van Soest...) ou enzymatiques (ex. : digestibilité de la matière organique à la pepsine-cellulase, dégradabilité enzymatique de l'azote...).

C. Les analyses chimiques complémentaires

Le process industriel appliqué peut conduire à une concentration dans le coproduit étudié de diverses fractions (produits cellulosiques, matières grasses, éléments azotés, fraction minérale...) suite à l'épuisement de la matière première initiale dans un autre composant (constituants de réserve par exemple) qui est valorisé dans la filière agro-industrielle.

Dans ce cas, pour mieux connaître la nature de la fraction majoritairement accumulée dans le coproduit, il conviendra de compléter l'approche analytique minimale présentée ci-dessus par des mesures complémentaires qui varieront selon le type de coproduit.

1. si le coproduit est riche en constituants pariétaux

Si le coproduit n'est pas connu (aucune information sur sa composition chimique, difficulté à l'assimiler à une famille d'aliments déjà connus), il sera judicieux d'effectuer une analyse complète des glucides pariétaux selon la méthode de Van Soest (NDF, ADF, ADL).

Si le coproduit appartient à une famille d'aliments déjà bien connus, on s'appuiera sur des relations de prédiction des critères Van Soest à partir de la teneur en CB en consultant les référentiels disponibles. Cependant, la nature des fractions pariétales varie fortement selon l'espèce botanique et le type d'organe de la plante. Ainsi, il sera préférable de faire appel à des relations établies intra famille botanique (ex. : famille de la graine de colza, famille du grain de maïs...), voire intra organe végétal (ex. : grains, tiges...).

Un exemple de relations établies pour la famille du blé et ses coproduits est présenté en figure 2.

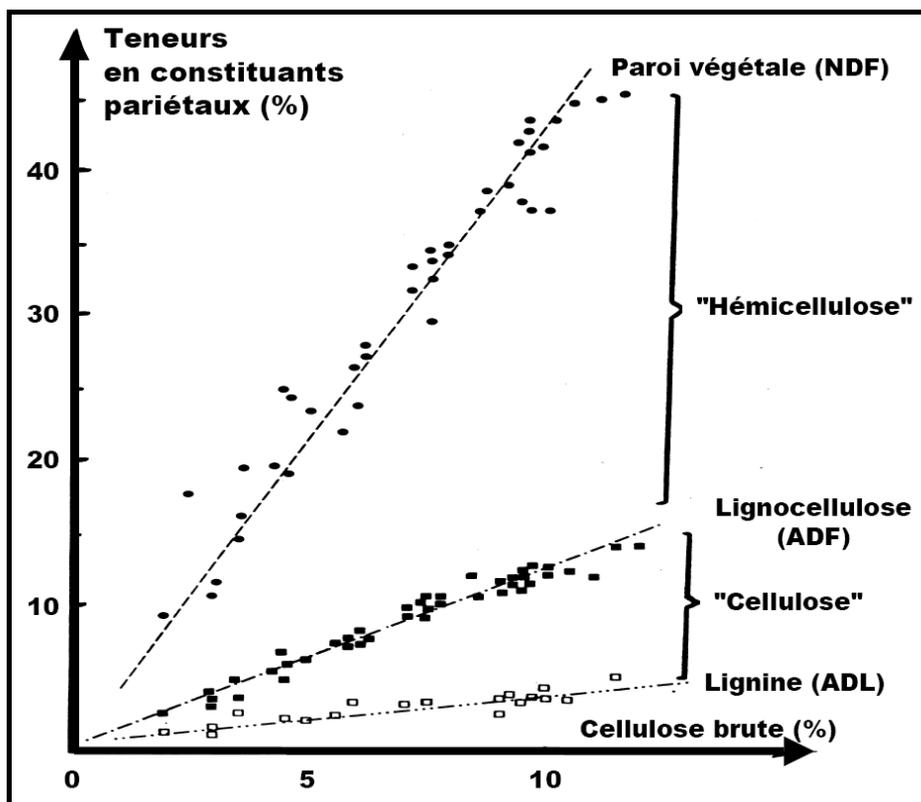


Figure 2 : relation entre la cellulose brute et les constituants pariétaux mesurés par la méthode Van Soest pour le blé et ses coproduits (Sauvant, 1981)

2. si le coproduit est riche en protéines et/ou enrichi en azote non protéique

Lorsque le coproduit est riche en azote, il conviendra de connaître la part liée à des formes d'azote non protéique (ammoniac, urée...) ou si la teneur élevée ne serait pas liée à un enrichissement lors du process agro-industriel (si tel est le cas, à quel taux ?).

Lorsque la teneur en MAT du coproduit est élevée (> 25-30 %) et/ou lorsque le coproduit est destiné à être distribué de façon importante dans la ration (si par exemple il est destiné à des animaux à haut niveau de production comme des vaches laitières), la connaissance du profil en acides aminés peut être intéressante, au moins pour les acides aminés (aa) facteurs limitants principaux (lysine et méthionine+cystine). Elle peut conduire à l'estimation des valeurs LysDI et MetDI des aliments.

Si le coproduit a subi un traitement thermique, il faut obligatoirement réaliser une mesure de dégradabilité enzymatique de l'azote (dE1) permettant de prédire plus précisément l'intensité de la protéolyse ruminale (DT) pour l'estimation des valeurs azotées.

3. si le coproduit est riche en matières grasses et/ou enrichi en matières grasses

Certains coproduits peuvent avoir une fraction matière grasse plus ou moins accessible. Dans ces cas de figure, il conviendra de demander une analyse « extrait étheré avec hydrolyse ».

Si le coproduit est riche en matières grasses, il faut faire une analogie avec la teneur en matières grasses de la matière première dont il est issu.

Si le coproduit a été enrichi en matières grasses et/ou chauffé, il peut être intéressant de connaître le profil en acides gras (spectre de C2 à C22).

Par ailleurs, il est impératif de savoir s'il y a eu adjonction d'anti-oxydant au coproduit pour en améliorer la conservation.

4. si le coproduit est riche ou enrichi en amidon ou glucides solubles

Quand le coproduit est enrichi en glucides de réserve (cas des coproduits enrichis en mélasse ou riches en amidon), l'estimation de la valeur nutritionnelle ne nécessite pas de dosage analytique supplémentaire au-delà de l'analyse fourragère classique. Cependant, la connaissance de la teneur en amidon ou en sucres solubles peut apporter des éclairages sur les modalités d'emploi du coproduit dans les rations afin de mieux en raisonner la qualité "hygiénique" ou "sanitaire".

5. si le coproduit est riche ou enrichi en minéraux

Quand le coproduit est riche ou enrichi en minéraux, il convient de savoir quels sont les éléments minéraux qui ont pu se concentrer dans le coproduit à partir de la matière première (ex : potassium des mélasses et vinasses...), quels additifs de transfert technologique et/ou additifs utilisés en alimentation humaine ont été ajoutés durant le process (ex. : sulfates de calcium des pulpes de betterave, carbonate de calcium de pulpes d'agrumes, sulfate d'ammonium des vinasses dépotassifiées...).

Il conviendra de se renseigner sur les seuils de toxicité de ces produits minéraux pour les animaux (ex. : problème du soufre lorsqu'il est < 3,5-4,0 g/kg MS de la ration totale, problème du cuivre pour les ovins...) et sur les risques potentiels d'interactions entre minéraux majeurs et/ou oligo-éléments (ex. : blocage du cuivre et du zinc par le soufre...).

Certains coproduits peuvent être particulièrement riches en matières minérales dont une partie peut être d'origine exogène (contamination par la terre). Dans ce cas, il peut être utile de connaître la teneur en insoluble chlorhydrique.

6. autres dosages et analyses à envisager

Dans le cas où le coproduit aurait risqué la combustion au cours de procédés de déshydratation, il s'agira de penser à la possibilité de présence de dioxines.

Si le coproduit est issu de matières premières ayant été traitées par des produits phytopharmaceutiques, il faudra penser au risque de présence de résidus.

S'il s'agit de coproduits de céréales destinés à des espèces sensibles, il conviendra d'envisager le risque de contamination par des mycotoxines.

Enfin, lorsque le coproduit est humide et est conservé chez l'industriel en tas à l'air libre, il risque d'avoir fermenté ou de s'être oxydé, ou d'avoir ranci. Il sera judicieux de prévoir une analyse de conservation pour évaluer les teneurs en produits de fermentation (acides gras volatiles, NH₃...) ou de rancissement. Cette information permet de mieux estimer la teneur en matière organique fermentescible (MOF) dans le calcul des valeurs azotées.

D. Connaissance de la variabilité de composition des coproduits

Pour les coproduits connus et/ou référencés dans les tables (par ex : pulpes de betteraves, drêches de brasserie...), il peut être intéressant de réaliser des analyses de contrôle sur 1 ou 2 critères (par ex. : MS et MAT pour les drêches ; MS et MM pour les pulpes de betterave...) afin d'appréhender la variabilité de composition selon les approvisionnements et, le cas échéant, procéder à un réajustement des valeurs nutritionnelles de l'échantillon du coproduit étudié par rapport aux valeurs proposées dans les tables. Une illustration relative à la pulpe de betterave déshydratée est présentée à titre d'exemple à la figure 3.

Cette variabilité de composition constatée sur un coproduit peut être comparée, d'une part, à celle observée dans la Banque de Données de l'Alimentation Animale (io7)² et, d'autre part, aux valeurs d'écart types publiées pour les principaux critères chimiques des matières premières dans les tables INRA-AFZ (Tran et Sauvant, 2002 ; Sauvant, Perez et Tran, 2004).

² io7 Banque de Données de l'Alimentation Animale : <http://www.feedbase.com/index.php>

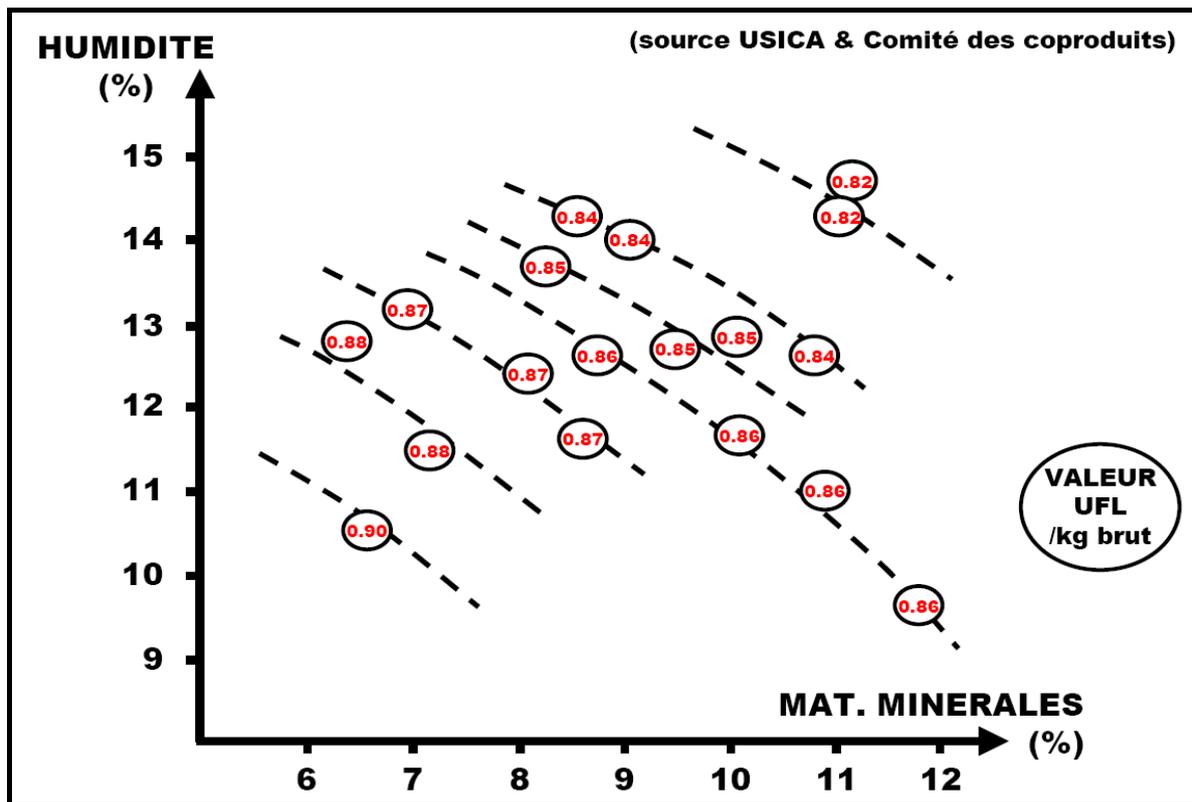


Figure 3 : influence de la teneur en minéraux et humidité sur la valeur énergétique des pulpes de betterave déshydratée (Chapoutot, n.p. d'après les données USICA et Comité National des Coproduits)

IO7

La Banque de Données de l'Alimentation Animale a pour mission la diffusion d'informations fiables et complètes concernant la composition chimique et la valeur nutritionnelle des matières premières. Créée en 1989 au sein du Département des Sciences Animales de l'INA-PG en France, la Banque de Données de l'Alimentation Animale réunit autour de l'Association Française de Zootechnie, 19 entreprises et organisations partenaires (fabricants d'aliments, instituts de recherche, organisations professionnelles). Ces structures mettent en commun une partie de leurs données techniques concernant la composition et la qualité des matières premières de l'alimentation animale, complétées par les informations collectées dans la littérature scientifique.

IO7 – La Banque de Données de l'Alimentation Animale contient des valeurs de composition et des données nutritionnelles pour plus de 2000 matières premières et 650 paramètres.

E. Les coûts des analyses chimiques

Comme nous l'avons vu, selon les objectifs que l'on a en terme de prédiction de la valeur des aliments, plusieurs niveaux de connaissance du coproduit sont proposés. Afin de compléter le raisonnement, il est nécessaire de prendre en compte le coût des analyses à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs.

4. Réflexions sur le choix des modèles de prédiction de la valeur des coproduits

La connaissance des données de composition chimique permet de prédire les valeurs nutritives des aliments en général et des coproduits en particulier. De nombreux modèles de prédiction ont été élaborés pour chaque critère nutritionnel. Le choix du modèle le plus adapté à une situation donnée met en jeu un certain nombre d'éléments de réflexion qui sont recensés dans cette 4^{ème} partie.

Les différents systèmes d'unités d'alimentation conduisant au calcul des valeurs énergétiques et azotées des aliments s'appuient sur les **différentes étapes de l'utilisation des éléments** nutritionnels dans l'organisme animal au niveau digestif et métabolique.

La nature des **variables prédites** peut différer selon la méthode de prédiction des valeurs nutritionnelles. En effet, cette prévision peut se faire de deux façons :

- soit par *démarche factorielle*, en estimant successivement à chacune des étapes de cette transformation les différents paramètres qui en reflètent l'efficacité (ex. : digestibilité de la matière organique, dégradabilité de l'azote dans le rumen...) ou bien en prédisant l'importance des pertes observées aux différents niveaux d'utilisation (ex. : flux de méthane, pertes d'énergie urinaire...)
- soit par *approche directe*, c'est-à-dire en prédisant directement les valeurs nutritionnelles énergétiques ou azotées, par des équations préexistantes..

Les différentes **variables prédictrices** mises en œuvre dans les modèles de prédiction, seules ou en combinaisons, peuvent être :

- des *critères chimiques*, qui permettent de quantifier l'importance des fractions qui influencent le plus l'utilisation des nutriments dans l'animal. Ainsi, le déterminant majeur de la digestibilité de la matière organique (dMO) est la teneur en glucides pariétaux estimés par la CB ou les paramètres de Van Soest (NDF, ADF, ADL). De même, l'importance des pertes d'énergie par voie urinaire peut être prédite à partir de la teneur en MAT des aliments, qui conditionne le niveau de couverture des besoins azotés de l'animal et par voie de conséquence le niveau de pertes azotées ;
- des *critères d'efficacité d'utilisation* des différentes fractions (digestibilité, dégradabilité, production de gaz...) estimés par des méthodes *in vitro* par incubation dans des cocktails enzymatiques (pepsine-cellulase, protéase...) ou dans du jus de rumen (méthode Tilley et Terry, méthode gaz-test ou HFT...);
- des *critères physiques* (réflectance, absorption...) reflétant la présence d'une fraction particulière dans le cadre de l'utilisation de certaines méthodes (SPIR : spectrométrie proche infra-rouge par exemple).

La prise en compte d'un nombre important de critères prédicteurs peut permettre d'améliorer la pertinence de la prédiction, mais peut conduire à une augmentation du **coût de cette prévision**. Un juste équilibre est donc à trouver en terme de rapport coût/bénéfice.

Enfin, les modèles de prédiction peuvent être établis sur **différentes populations d'aliments**, qu'il s'agisse de fourrages ou de concentrés :

- *aliments simples issus d'une même famille botanique* (ex. : fourrages de graminées ou de légumineuses) ou appartenant à un *même type d'organe végétal* (ex. : la famille de la graine de colza). Ces modèles de prédiction "intra famille" ont l'avantage de répondre de façon précise à un problème de prédiction pour un aliment donné. Cependant, ils n'existent pas forcément pour toutes les familles de coproduits ;
- *ensembles d'aliments simples appartenant à différentes familles botaniques*. Ces modèles peuvent être utilisés de manière plus large pour différentes gammes d'aliments. Cependant, il peut apparaître un biais systématique par rapport à la tendance générale pour une famille d'aliment particulier. Certains de ces modèles proposent des facteurs correctifs par famille végétale ou par groupe de matières premières ;
- *mélanges de matières premières*, sous forme d'aliments composés. Compte tenu de la diversité des formules, les biais observés par famille de matières premières dans les modèles précédents sont globalement "lissés". Cependant, la précision du modèle peut être influencée par certaines matières premières particulières (Giger-Reverdin, 1994). De plus, ces modèles peuvent conduire à des écarts de prédiction importants quand ils sont utilisés pour des coproduits qui ne rentrent pas dans les formules habituelles.

Lorsque plusieurs modèles sont disponibles pour une même variables à prédire, **le choix du modèle de prédiction le plus pertinent** doit se raisonner sur la base de critères statistiques, notamment à travers l'écart type résiduel (ETR) qui traduit **la précision du modèle** : plus l'ETR est faible, plus le modèle est précis.

La précision du modèle doit être raisonnée par comparaison à la précision de la mesure expérimentale de la variable prédite. Ainsi, par exemple pour la digestibilité de la matière organique (dMO), certains modèles de prédiction à partir d'analyses chimiques montrent un niveau de précision qui est du même ordre de grandeur que celle de la mesure expérimentale de la dMO (environ 2 points) alors que d'autres, moins pertinents, ont un précision bien moins bonne (cf. Tableau 1).

Tableau 1 : précision de différents modèles de prédiction de la dMO des aliments concentrés composés pour ruminants (Giger-Reverdin, 1990)

$dMO = 81,2 - 0,03 CB + 0,016 MAT$	$R = - 0,42$ et $ETR = 4,26$
$dMO = 87,9 - 0,26 ADL$	$R = - 0,81$ et $ETR = 2,77$
$dMO = 89,9 - 0,029 NDF + 0,036 ADF - 0,25 ADL$	$R = - 0,85$ et $ETR = 2,51$
$dMO = 91,8 - 0,033 NDF + 0,042 ADF - 0,25 ADL - 0,040 EE$	$R = - 0,87$ et $ETR = 2,39$
Ajustements statistiques de mesures d'analyse chimique sur des observations réalisées sur moutons castrés « standard ».	
88 aliments composés	
Caractéristiques analytiques exprimées en g/kg MO	

De plus, lorsque cette information est disponible pour une relation $Y = f(X)$, il est important de considérer les plages de variation observées pour les variables prédictives (X) et pour les variables prédites (Y) dans la population d'aliments utilisés pour concevoir le modèle.

En effet, pour un échantillon donné, **la précision associée à la valeur prédite** est maximale lorsque la valeur X de cet échantillon est proche de la valeur moyenne calculée dans la population d'origine (cf. Figure 4).

Un exemple relatif à la prédiction de la dégradabilité théorique de l'azote à partir de dégradabilité enzymatique est donné par la Figure 5.

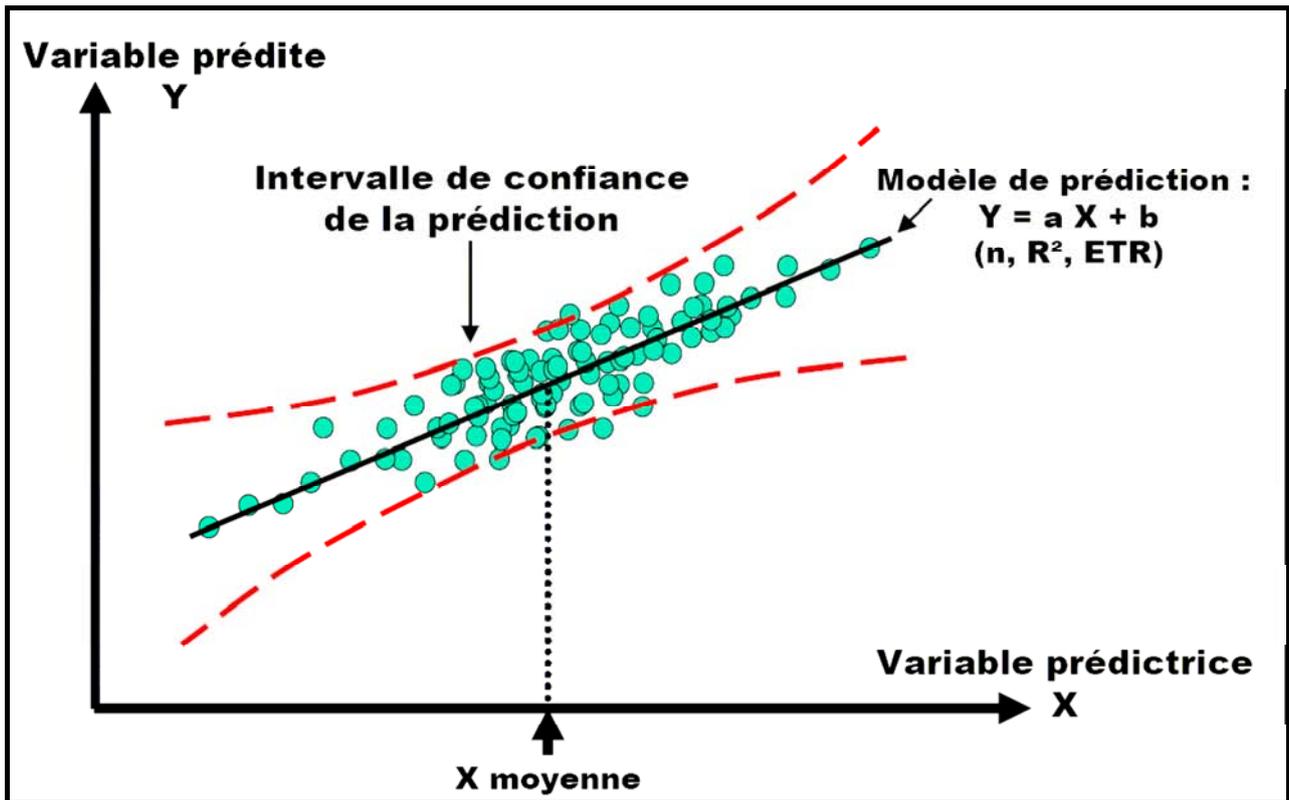


Figure 4 : prise en compte de la précision des modèles de prédiction

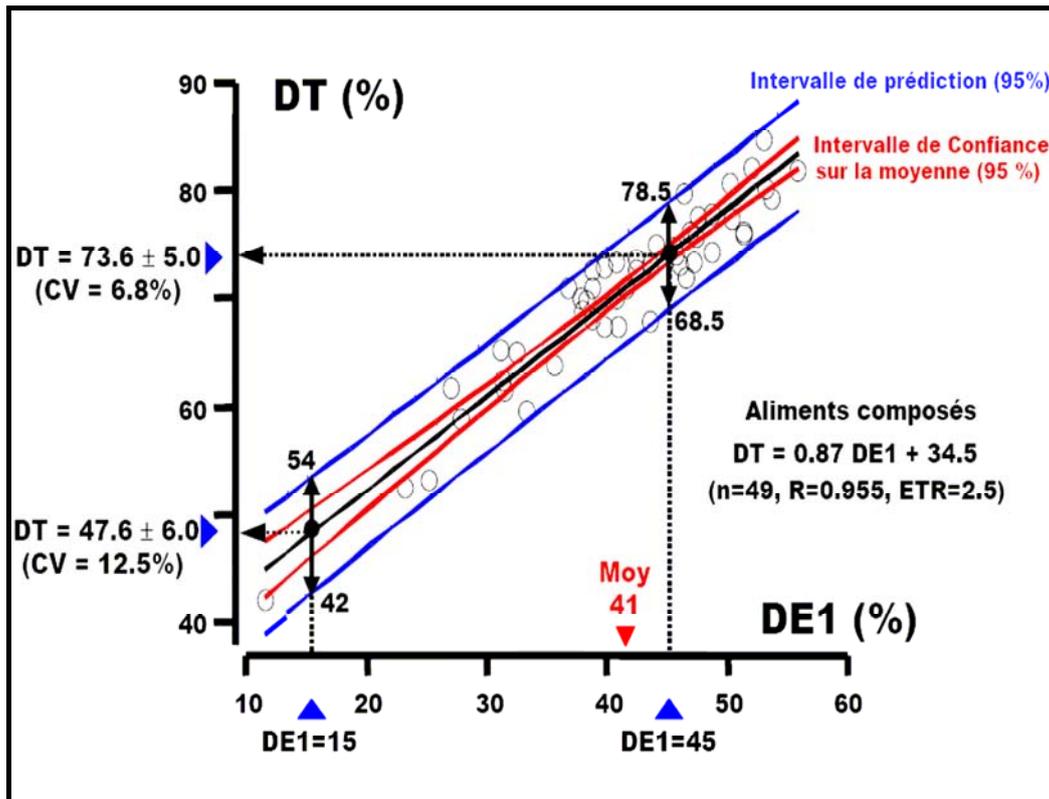


Figure 5 : incidence de la valeur DE1 d'un échantillon sur la précision de la DT estimée (d'après les données de Aufrère et al., 1989)

Par ailleurs, lorsqu'il n'existe pas de modèle de prédiction applicable pour un critère donné et un coproduit donné, il est toujours possible d'appliquer un **raisonnement par analogie** en s'appuyant sur les informations relatives aux aliments de la même famille référencés dans les tables.

Enfin, quelle que soit la démarche utilisée pour la prévision d'une valeur nutritive, il est toujours important de **comparer les valeurs prédites issues des différentes approches ou divers modèles** de prédiction disponibles pour conforter l'estimation et éliminer les risques de biais éventuels liés à un modèle particulier.

5. Principe général de calcul de la valeur nutritive des coproduits

5.1. Calcul de la valeur énergétique des coproduits

5.1.1. Principe général

La démarche de calcul de la valeur énergétique des aliments pour ruminants proposée par l'INRA (INRA, 1978 ; INRA, 1988 ; Tran et Sauvant, 2002 ; Sauvant, Perez et Tran, 2004) est présentée à la Figure 6.

La transformation dans l'organisme animal de l'énergie contenue dans les aliments (énergie brute EB) intègre les différents postes de pertes d'énergie au niveau digestif : pertes d'origine fécale (EF) et sous forme de gaz (EG) et au niveau métabolique : pertes d'origine urinaire (EU) et sous forme d'extra-chaaleur (EC). Elle conduit à la quantification d'un flux d'énergie nette (EN) disponible pour les cellules des tissus de l'organisme. Chacune de ces étapes de transformation de l'énergie dépend, d'une part, des caractéristiques de l'aliment et, d'autre part, du type d'animal utilisateur.

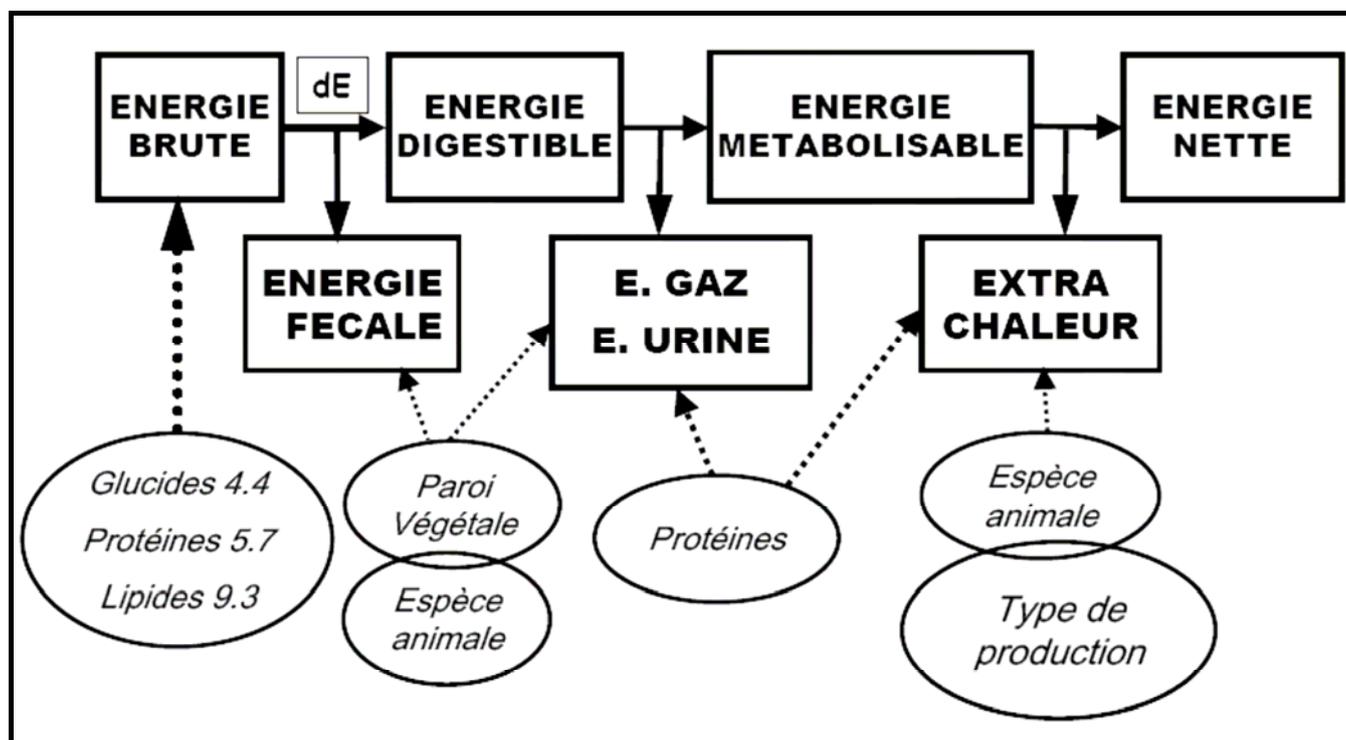


Figure 6 : schéma des différentes étapes de l'utilisation de l'énergie chez les animaux (Tran et Sauvant, 2002) (glucides, protéines et lipides exprimés en kcal/g)

L'estimation de la valeur énergétique des coproduits peut donc se faire selon trois approches :

- soit par la *méthode factorielle*, qui consiste à estimer chacun des paramètres des différentes étapes de transformation de l'énergie ;
- soit par *approche directe*, permettant d'estimer directement les teneurs en énergie nette des aliments, exprimées en UFL et UFV ;
- soit par *analogies*, à partir des valeurs des aliments référencés dans les différentes tables.

5.1.2. Prédiction de la valeur énergétique par la méthode factorielle

La teneur en énergie brute des aliments est calculée et chacune des étapes de l'utilisation de cette énergie par l'animal peut faire l'objet de modèles de prédiction, soit de l'amplitude des pertes, soit du rendement de la transformation de l'énergie au cours de cette étape, en fonction de caractéristiques propres à l'aliment ou en fonction du type d'animal utilisateur.

5.1.2.1. Teneur en énergie brute

La teneur en énergie brute (EB) dépend directement de la partition de la matière organique entre ses différents composants (glucides, lipides, protides).

Elle peut être mesurée en laboratoire par bombe calorimétrique ou estimée à partir de la composition chimique des aliments. Différents modèles de prédiction de la teneur en EB des aliments en fonction de leur composition chimique sont disponibles. Les tables INRA-AFZ (Sauvant, Perez et Tran, 2004) proposent le modèle suivant, établi à partir des teneurs en matières azotées totales (MAT), en matière grasse (MG), en cellulose brute (CB) et en matières minérales (MM), qui intègre un facteur correctif selon la famille des aliments :

$$EB = 4134 + 14,73 \text{ MAT} + 52,39 \text{ MG} + 9,25 \text{ CB} - 44,60 \text{ MM} + \Delta$$

avec EB en kcal/kg MS ; MAT, MG, CB, MM en % MS ; Δ fonction du type d'aliment (Tableau 2).

Tableau 2 : Coefficient correcteur Δ applicable à la teneur en EB selon la nature des aliments (Sauvant, Perez et Tran, 2004)

Aliments	Coefficient Δ
Corn gluten meal	308
Concentré protéique de luzerne	248
Drèches de distillerie de blé, gluten feed de blé	138
Graine de colza, graine de lin, graine de coton, tourteau de coton	116
Avoine, issues de blé, corn gluten feed, drèches d'amidonnerie de maïs, farine basse de maïs, sorgho	75
Herbe déshydratée, paille	46
Orge	36
Radicelles d'orge	- 43
Tourteau de lin, tourteau de palmiste, graine de soja, tourteau de soja, tourteau de tournesol, graine de tournesol	- 46
Manioc	- 55
Féverole, lupin, pois	- 87
Pulpe de betterave, mélasse, vinasse, pulpe de pomme de terre	- 103
Lactosérum	- 177
Coques de soja	- 231
Autres matières premières sauf amidon et drèches de brasserie	0

Une équation particulière est proposée pour les drèches de brasserie et l'amidon de maïs :

$$EB = 54,93 \text{ MAT} + 93,01 \text{ MG} + 41,57 \text{ Amidon} + 39,54 \text{ Sucres} + 45,01 \text{ NDF} + 42,36 \text{ Résidu}$$

avec EB en kcal/kg MS ; MAT, MG, Amidon, Sucres, NDF en % MS
et Résidu = MO – MAT – MG – Amidon – Sucres – NDF en % MS.

5.1.2.2. Estimation de la digestibilité de l'énergie brute

Le rendement de la transformation de l'énergie brute en énergie digestible, appelé digestibilité de l'énergie brute (dE), est le déterminant principal de la valeur énergétique des aliments. Il dépend étroitement de l'efficacité de l'utilisation digestive de la matière organique qui est vecteur d'énergie.

a) Prédiction de la digestibilité de la matière organique

La prédiction de la digestibilité *in vivo* de la matière organique (dMO) est donc une étape clé de la démarche factorielle.

La valeur de la dMO dépend principalement de l'importance de la fraction pariétale des aliments qui pénalise les phénomènes digestifs dans le tube digestif de l'animal. Cette fraction est estimée par la cellulose brute (CB) ou encore plus précisément par le fractionnement de Van Soest (en NDF, ADF et ADL).

Des modèles de prédiction de la dMO, tenant compte le plus souvent de la teneur en CB, sont disponibles pour un grand nombre de groupes de matières premières connues. Ainsi, par exemple, six modèles de prédiction, applicables à divers groupes d'ingrédients, ont été publiés dans les tables INRA-AFZ (Tran et Sauvante, 2002 ; Sauvante, Perez et Tran, 2004). Ils sont présentés dans le Tableau 3.

Cependant, d'autres critères peuvent être utilisés pour estimer la dMO. Il s'agit notamment des méthodes *in vitro* faisant intervenir des hydrolyses enzymatiques (cellulase ou pepsine-cellulase...), des processus fermentaires dans du jus de rumen (digestibilité *in vitro*, mesures de gaz...) ou encore des mesures de dégradation de la matière sèche mesurées en sachets de nylon.

Ainsi, le Tableau 4 présente quelques unes des équations de prédiction de la dMO des fourrages à partir de la pepsine-cellulase, notifiée DcellMO, proposées par Aufrère *et al.* (2005).

Les équations applicables aux aliments concentrés simples et composés sont les suivantes (INRA, 2007) :

Concentrés simples : $dMO = 0,699 D_{cellMO} + 22,6$ (n = 24 ; R = 0,98 ; ETR = 3,2)

Concentrés composés : $dMO = 0,648 D_{cellMO} + 26,5$ (n = 83 ; R = 0,74 ; ETR = 2,4)
(avec dMO et DcellMO en %)

**Tableau 3 : modèles de prédiction de la digestibilité de la matière organique (dMO)
pour 6 groupes d'ingrédients déterminés (Sauvant *et al.*, 2004)**

Céréales et coproduits de céréales	
dMO = 95,81 – 1,911 CB + α	(n = 124 ; r = 0,93 ; ETR = 3,7)
avec $\alpha = - 2,54$	tous sauf les coproduits du maïs
$\alpha = + 2,54$	coproduits du maïs
• Tourteau de colza, tournesol, coton, coprah et palmiste, graine de coton	
dMO = 97,51 – 1,498 CB	(n = 29 ; r = 0,79 ; ETR = 6,5)
• Graines de légumineuses, tourteaux d'arachide et de soja	
dMO = 87,75 – 0,314 CB + α	(n = 46 ; r = 0,74 ; ETR = 3,8)
avec $\alpha = - 4,36$	graine de soja
$\alpha = - 1,86$	tourteau d'arachide
$\alpha = + 6,22$	autres graines de légumineuses, tourteau de soja
• Pulpe de betterave et pulpe d'agrumes	
<i>Pulpe de betterave :</i>	
dMO = 87,20 – 0,951 x (CB – 16,39)	
<i>Pulpe d'agrumes :</i>	
dMO = 84,11 – 1,374 x (CB – 16,39)	
(pour les deux groupes : n = 34 ; r = 0,86 ; ETR = 2,0)	
• Manioc, mélasse, vinasse, pomme de terre	
dMO = 97,81 – 1,12 NDF	(n = 5 ; r = 0,98 ; ETR = 2,6)
• Fourrages déshydratés	
<i>Luzerne :</i>	
dMO = 65,90 – 0,919 x (ADF – 29,83)	
<i>Graminées :</i>	
dMO = 74,13 – 1,364 x (ADF – 29,83)	
(pour les deux groupes : n = 32 ; r = 0,86 ; ETR = 3,6)	
(avec CB, NDF et ADF exprimées en % MS et dMO exprimée en %)	

**Tableau 4 : modèles de prédiction de la dMO des fourrages
à partir de la digestibilité pepsine-cellulase (Aufrère *et al.*, 2005)**

	Dcellms			dMO			n	Equations	R ²	ETR
	moy	min	max	moy	min	max				
Fourrages verts										
Graminées	68,2	39,8	84,4	72,5	48,8	84,6	177	dMO = 0,630 Dcellms + 29,7	0,78	2,94
Graminées -TB	72,7	60,2	86,5	72,9	61,6	83,2	60	dMO = 0,630 Dcellms + 26,4		
Légumineuses	66,9	57,5	76,8	66,5	57,2	78,1	32	dMO = 0,949 Dcellms + 3,00	0,86	2,21
Fourrages fermentés										
Graminées	60,9	47,1	72,6	68,5	61,4	74,7	39	dMO = 0,459 Dcellms + 40,5	0,83	1,69
Légumineuses	64,0	55,2	72,8	63,4	57,9	67,4	25	dMO = 0,459 Dcellms + 34,0		
Foins										
Graminées	54,7	38,6	76,2	61,0	50,2	72,5	37	dMO = 0,626 Dcellms + 26,8	0,77	2,58
Légumineuses	60,7	51,8	69,1	58,3	54,0	64,7	14	dMO = 0,626 Dcellms + 20,3		

b) Calcul de la digestibilité de l'énergie

La digestibilité de l'énergie est ensuite calculée à partir de la dMO et de la composition chimique des aliments. Ainsi, différents modèles de prédiction sont proposés pour les ruminants (Sauvant *et al.*, 2004) :

$$dE = dMO - 3,94 + 0,104 \text{ MAT} + 0,149 \text{ MG} + 0,022 \text{ NDF} - 0,244 \text{ MM} \\ (n = 183 ; r = 0,68 ; \text{ETR} = 1,5)$$

$$dE = dMO - 3,50 + 0,046 \text{ MAT} + 0,155 \text{ MG} \\ (n = 216 ; r = 0,49 ; \text{ETR} = 1,8)$$

$$dE = dMO - 2,90 + 0,051 \text{ MAT} \\ (n = 250 ; r = 0,35 ; \text{ETR} = 2,0)$$

avec dE et dMO exprimées en % ; MAT, MG, NDF et MM exprimées en % de la matière sèche.

Le choix d'une de ces 3 équations dépend évidemment des caractéristiques analytiques disponibles, sachant qu'on cherchera toujours à utiliser l'équation la plus précise.

5.1.2.3. Transformation de l'énergie digestible en énergie métabolisable

La transformation de l'énergie digestible en énergie métabolisable prend en compte l'importance des pertes d'énergie d'origines gazeuse et urinaire. Ces deux postes de pertes dépendent respectivement de la teneur en constituants pariétaux et en constituants azotés des aliments.

Ainsi, le rendement EM/ED de cette étape peut être estimé par le modèle suivant :

$$\text{EM/ED} = 86,38 - 0,099 \text{ CBo} - 0,196 \text{ MATo}$$

avec EM/ED exprimé en % ; CBo et MATo exprimées en % de matière organique.

5.1.2.4. Transformation de l'énergie métabolisable en énergie nette

Le rendement de la transformation de l'énergie métabolisable en énergie nette dépend principalement de la fonction physiologique assurée par l'animal ruminant (k_l pour le lait ou k_{mf} pour la viande) et du niveau de concentration énergétique de l'aliment ($q = \text{EM/EB}$, avec $0 \leq q \leq 1$) (Vermorel, 1978) :

$$\text{Pour l'entretien et la lactation+engraissement : } k_l = 0,60 + 0,24 (q - 0,57)$$

$$\text{Pour l'entretien et la production de viande : } k_{mf} = (1,5 k_m k_f) / (k_f + 0,5 k_m) \\ \text{avec } k_m = 0,287 q + 0,554 \text{ et } k_f = 0,78 q + 0,006$$

5.1.2.5. Calcul de la valeur UFL et UFV

La teneur en énergie nette pour la lactation, exprimée en UFL, ou pour la production de viande, exprimée en UFV, peut être calculée à partir de ces différents déterminants estimés précédemment (Vermorel, 1988) :

$$\text{UFL} = (\text{EB} \times \text{ED/EB} \times \text{EM/ED} \times k_l) / 1700$$

et

$$\text{UFV} = (\text{EB} \times \text{ED/EB} \times \text{EM/ED} \times k_{mv}) / 1820$$

Il est recommandé de tester l'incidence d'une légère variation (par exemple ± 1 écart type) de la valeur prédite pour les différents critères d'utilisation, notamment pour la dMO, sur les valeurs énergétiques finales UFL et UFV.

5.1.3. Prédiction directe des valeurs UFL et UFV des coproduits

À côté de la démarche factorielle, il est possible d'estimer directement les valeurs UFL et UFV des aliments en fonction de leur composition chimique en tenant compte des principaux critères chimiques pouvant avoir une incidence sur la teneur en énergie nette.

Différents modèles ont été publiés pour différents types d'aliments, matières premières simples, groupe d'aliments de même famille botanique ou aliments composés.

5.1.3.1. Modèles établis sur un groupe de matières premières diverses

Des modèles de prédiction des valeurs UFL et UFV sont proposés par Sauvant *et al.* (2004) élaborés à partir du jeu de données des tables INRA-AFZ (Sauvant, Perez et Tran, 2004) caractérisée par une grande diversité de matières premières. La variabilité résiduelle observée est due notamment à quelques matières premières particulières (Figure 7).

Si l'on exclut de l'analyse les matières premières les plus influentes (résidus "studentisés" > 2), les ETR de ces modèles se rapprochent de ceux des modèles plus anciens :

$$UFL_o = 118 + 0,256 MAT_o + 1,58 MGo - 1,02 CBo - 2,07 ADLo$$

(n = 70 ; R = 0,96 ; ETR = 6,0)

$$UFV_o = 120 + 0,214 MAT_o + 1,62 MGo - 1,19 CBo - 2,64 ADLo$$

(n = 69 ; R = 0,96 ; ETR = 7,1)

avec UFL_o et UFV_o pour 100 kg de MO et les caractéristiques analytiques exprimées en % MO

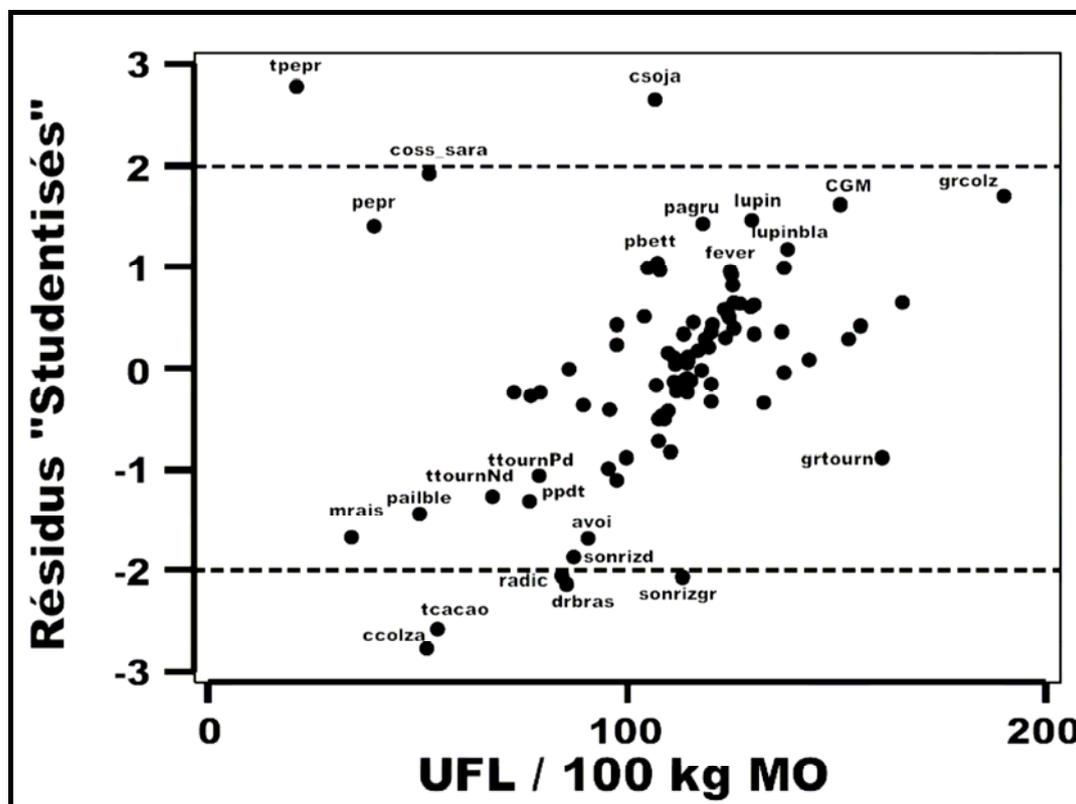


Figure 7 : influence de quelques matières premières sur la précision du modèle de prédiction des UFL à partir de l'analyse fourragère classique (données des tables INRA-AFZ, Sauvant *et al.*, 2004)

5.1.3.2. Modèles établis sur des matières premières de même famille

Certains modèles ont pu être établis sur des matières premières homogènes, de même nature, appartenant à la même famille botanique, ou issues d'un même organe végétal.

Les exemples d'équations de calcul proposées par Sauvant *et al.* (1987) pour différents groupes de matières premières sont regroupés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : équations de calcul de la valeur énergétique des principaux groupes d'aliments simples (Sauvant *et al.*, 1987)

Groupes d'aliments	Type d'UF	Cellulose Brute (CB)		Lignocellulose (ADF)		Protéines brutes (MAT)	
		Régression		Régression		Régression	
		Constante	Coefficient	Constante	Coefficient	Constante	Coefficient
Blé et coproduits	UFL	1.30	-0.041	1.32	-0.034		
	UFV	1.33	-0.051	1.36	-0.042		
Maïs et coproduits	UFL	1.31	-0.021	1.32	-0.020		
	UFV	1.33	-0.025	1.34	-0.024		
Orge et coproduits	UFL	1.28	-0.024	1.32	-0.027		
	UFV	1.27	-0.020	1.28	-0.022		
Tourteau soja	UFL	1.20	-0.005	1.20	-0.004	0.95	0.004
	UFV	1.19	-0.006	1.19	-0.005	0.90	0.005
Tourteau Tournesol	UFL	1.16	-0.016	1.22	-0.016	0.10	0.018
	UFV	1.09	-0.017	1.14	-0.017	-0.01	0.018

(UFL et UFV par kg MS ; critères chimiques en % MS)

La même logique utilisant les données des tables INRA-AFZ (2004) pour le blé et le maïs et leurs coproduits (Figure 8) conduisent aux équations suivantes :

Blé et coproduits :

$$UFLo = 129 - 2,35 CBo \quad (n = 12 ; R = 0,93 ; ETR = 3,3)$$

$$UFVo = 132 - 3,09 CBo \quad (n = 12 ; R = 0,93 ; ETR = 3,3)$$

ou mieux :

$$UFLo = 125 - 3,33 CBo + 2,75 MGo \quad (n = 12 ; R = 0,99 ; ETR = 1,0)$$

$$UFVo = 127 - 4,01 CBo + 2,58 MGo \quad (n = 12 ; R = 0,99 ; ETR = 0,9)$$

avec UFLo et UFVo pour 100 kg de MO et les caractéristiques analytiques exprimées en % MO

Maïs et coproduits :

$$UFLo = 147 - 3,25 CBo \quad (n = 9 ; R = 0,87 ; ETR = 8,3)$$

$$UFVo = 149 - 3,78 CBo \quad (n = 9 ; R = 0,90 ; ETR = 8,6)$$

ou mieux :

$$UFLo = 122 - 2,53 CBo + 1,75 MGo + 0,38 MATo \quad (n = 9 ; R = 0,99 ; ETR = 2,9)$$

$$UFVo = 125 - 3,11 CBo + 1,89 MGo + 0,35 MATo \quad (n = 9 ; R = 0,99 ; ETR = 3,2)$$

avec UFLo et UFVo pour 100 kg de MO et les caractéristiques analytiques exprimées en % MO

Cette démarche par analogie entre matières premières d'une même famille peut être appliquée à tous types d'aliments. C'est cette logique qui a été suivie en particulier par Doreau *et al.* (2006) pour estimer la valeur des tourteaux gras à partir des valeurs tabulées des tourteaux, graines et huiles de colza et tournesol (Figure 9). Un autre exemple concernant les coproduits de tournesol est présenté à la Figure 10 et détaillé en annexe 2.

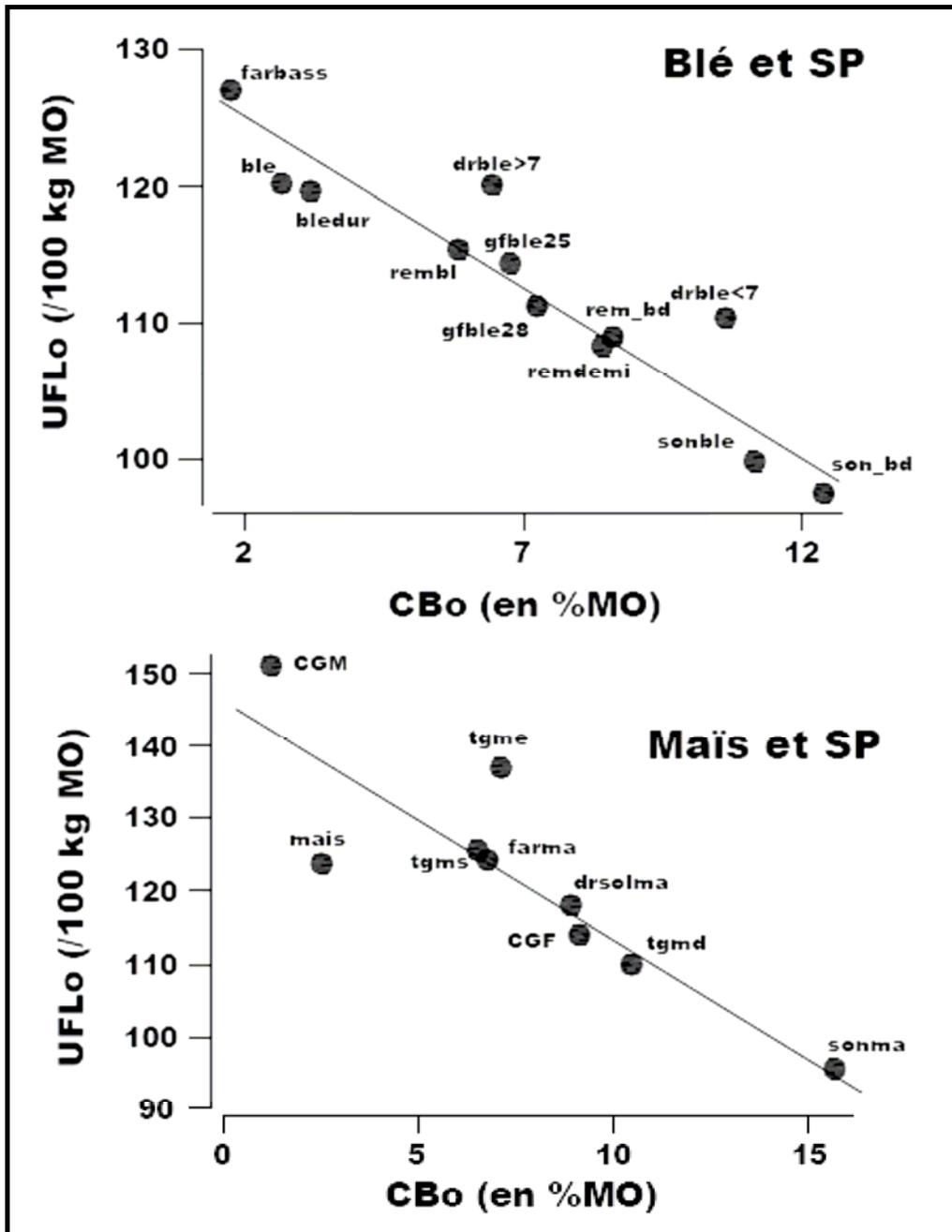


Figure 8 : relations entre UFL et CB pour le blé et le maïs et leurs sous-produits (SP) (d'après les données des tables INRA-AFZ, Sauvant *et al.*, 2004)

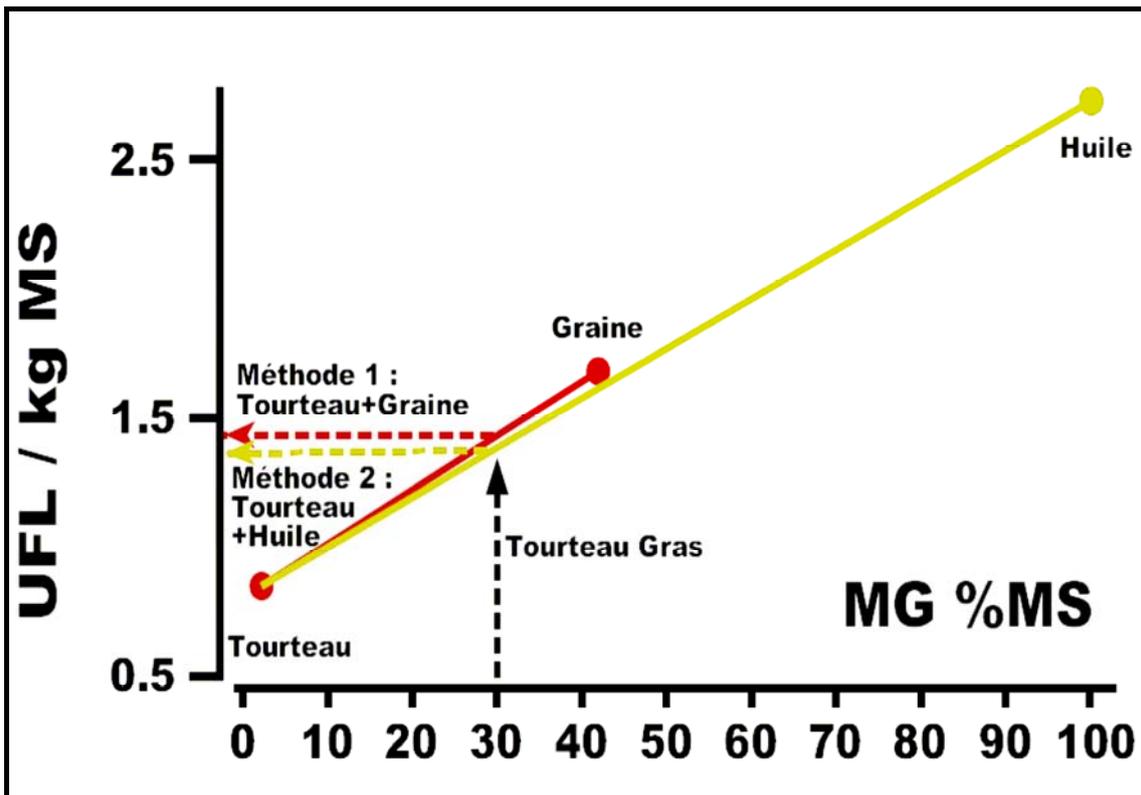


Figure 9 : méthode d'estimation de la valeur énergétique des tourteaux gras de colza (d'après Doreau *et al.*, 2006)

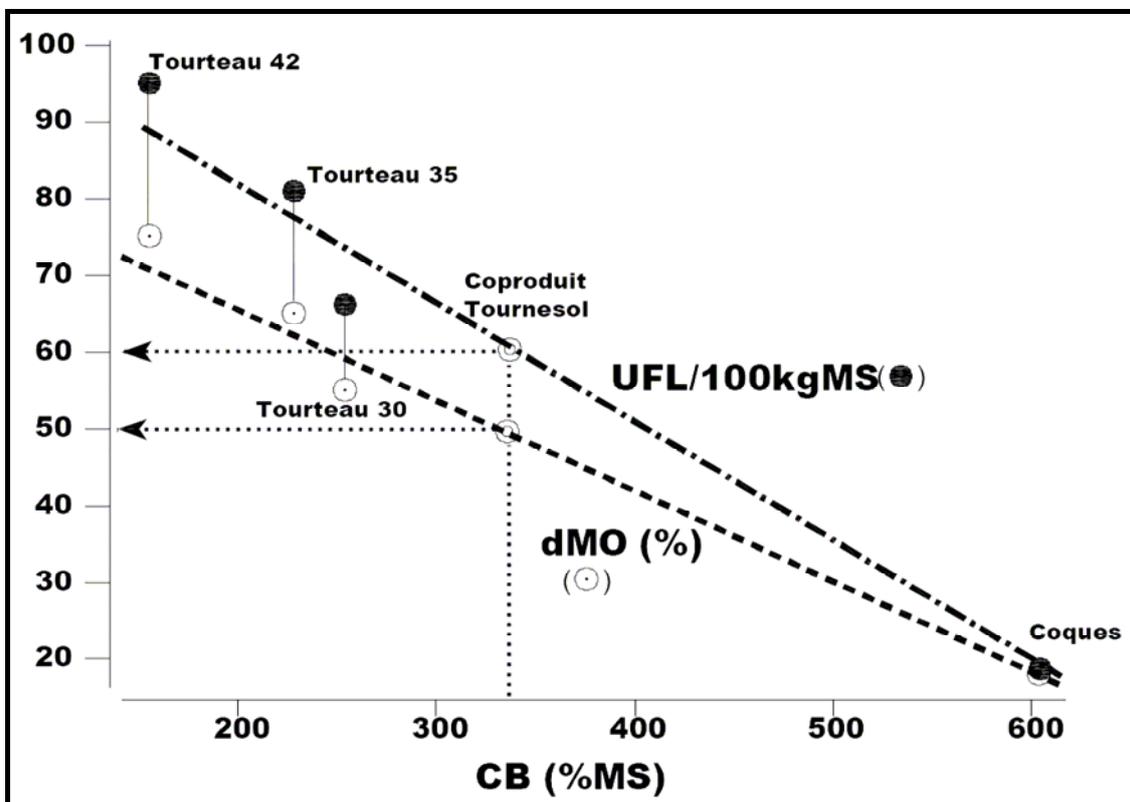


Figure 10 : prévision de la dMO et de la valeur UFL des coproduits de tournesol à partir des données tables INRA 1988 (Chapoutot, 2000)

5.1.3.3. Modèles établis sur des aliments composés

En l'absence de modèles spécifiques à une famille de coproduits ou de modèles établis sur un ensemble de matières premières, il est possible de se tourner vers les modèles de prédiction de la valeur énergétique établis pour des aliments composés.

Quelques exemples issus des publications de Giger-Reverdin *et al.* (1990 et 1994) sont proposés au Tableau 6. Les valeurs d'écart types résiduels de ces modèles restent voisines des modèles obtenus sur des ensembles de matières premières variées (5-6 UFL et 6-7 UFV / 100 kg MO).

Il est à noter cependant que l'utilisation de ces modèles "aliments composés" pour des coproduits qui ne sont pas couramment incorporés dans les formules risque d'entraîner certains biais dans l'estimation de leur valeur énergétique.

Tableau 6 : modèles de prédiction des valeurs énergétiques des aliments composés pour ruminants
(d'après Giger-Reverdin *et al.*, 1994)

Valeurs UF Lait (en UF/kg MO)

Constante	EB	MG	NDF	ADFs	ADLs	ADLd	Lic	DcellMO	MAT	R	ETR
	0,063					- 0,00485				0,80	0,402
1,129		0,00145				- 0,00444			0,000304	0,81	0,395
	0,07						- 0,00372			0,81	0,410
1,139		0,00148					- 0,00347		0,000255	0,81	0,400
0,585	0,036		- 0,000638	0,000805	- 0,00461					0,86	0,350
1,211		0,001	- 0,000603	0,000733	- 0,00427				0,000227	0,86	0,352
- 1,298	0,07							0,0131	- 0,000351	0,82	0,362
		0,00173						0,0127		0,84	0,366

Valeurs UF Viande (en UF/kg MO)

Constante	EB	MG	NDF	ADFs	ADLs	ADLd	Lic	DcellMO	MAT	R	ETR
	0,0629					- 0,00579				0,79	0,522
1,129		0,00136				- 0,00542			0,000279	0,80	0,515
	0,0627						- 0,00444			0,78	0,533
1,2		0,00129					- 0,00441			0,78	0,530
0,726	0,0292		- 0,000775	0,000958	- 0,00544					0,85	0,455
1,286		0,000709	- 0,00079	0,000927	- 0,00525					0,84	0,463
- 1,526	0,0699							0,0157	- 0,00041	0,84	0,471
		0,00155						0,0124		0,83	0,479

N = 83 aliments

EB en UF/kg MO, critères analytiques exprimés en g/kg MO, DcellMO en %

5.2. Calcul de la valeur azotée d'un coproduit

5.2.1. Principe général

Les valeurs azotées des aliments pour ruminants, exprimées dans le système PDI (INRA, 1978 ; INRA, 1988 ; Tran et Sauvant, 2002 ; Sauvant, Perez et Tran, 2004 et INRA, 2007), représentent le flux global d'acides aminés absorbés au niveau intestinal, à la fois d'origine alimentaire et d'origine microbienne. La Figure 11 présente la structure générale de ce système.

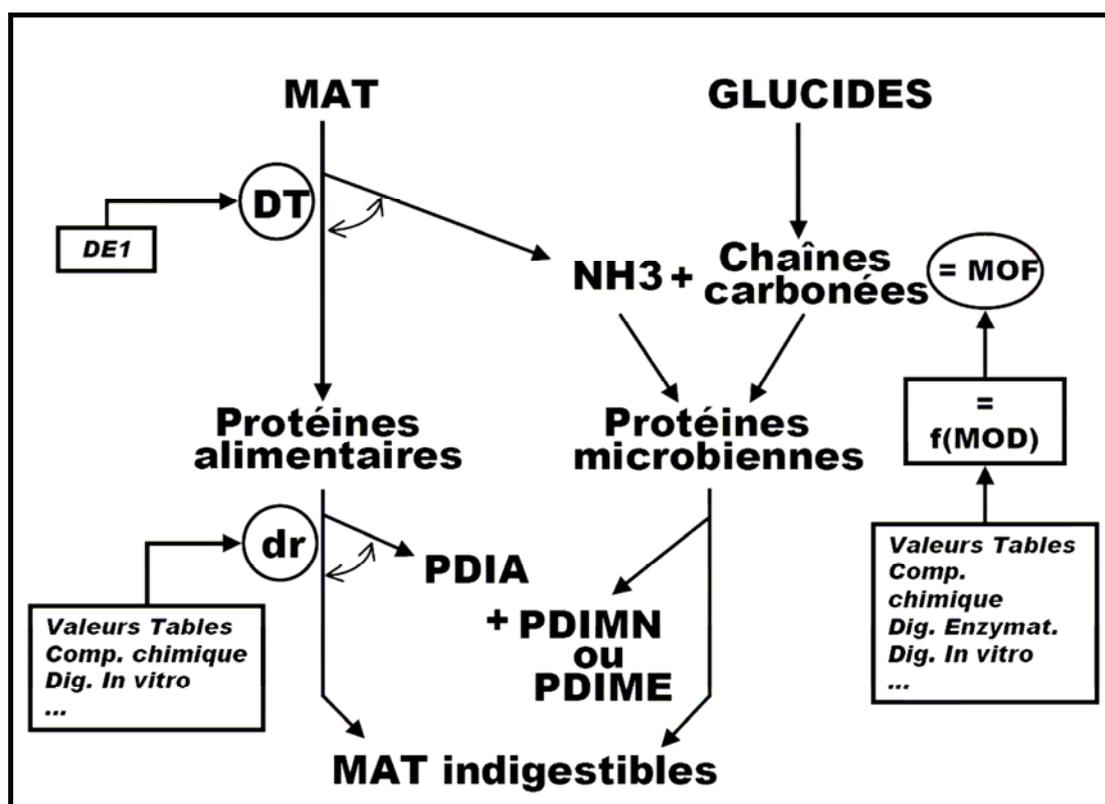


Figure 11 : principes de calcul des valeurs PDI des aliments (d'après INRA, 1988)

Le flux d'acides aminés d'origine alimentaire (PDIA) dépend de la teneur en MAT des aliments, de l'intensité de la protéolyse ruminale, appréciée par la dégradabilité théorique (DT), et de la digestibilité intestinale (dr).

Le flux d'origine microbienne (PDIM) est calculé dans deux situations distinctes, selon que le facteur limitant principal de la protéosynthèse microbienne dans le rumen est l'ammoniac (= valeur PDIMN) ou l'énergie procurée par la matière organique fermentescible (MOF) provenant des chaînes carbonées (= valeurs PDIME).

Les valeurs PDIN et PDIE résultantes sont donc :

$$\text{PDIN} = \text{PDIA} + \text{PDIMN}$$

$$\text{et PDIE} = \text{PDIA} + \text{PDIME}$$

Les équations de calcul proposées en 1988 (Vérité *et al.*, 1987 ; INRA, 1988) et conservées dans les tables plus récentes INRA-AFZ (Tran et Sauvant, 2002 ; Sauvant, Perez et Tran, 2004 ; INRA, 2007) sont les suivantes :

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

$$PDIMN = MAT \times [1 - 1,11 (1 - DT)] \times 0,9 \times 0,8 \times 0,8$$

$$PDIME = MOF \times 0,145 \times 0,8 \times 0,8$$

avec PDIA, PDIMN et PDIME exprimées en g/kg MS ; MAT et MOF en g/kg MS ; $0 \leq DT$ et $dr \leq 1$.

La teneur en matière organique fermentescible (MOF) repose sur le calcul suivant :

$$MOF = k \times MOD - MG - MAT (1 - DT) - PV$$

qui tient compte de la fraction amyliacée plus ou moins dégradabile (k) et des produits volatils (PV).

De la même façon que pour l'énergie, la prédiction des valeurs azotées peut se faire selon la *méthode factorielle*, en estimant les paramètres relatifs à chacune des étapes de l'utilisation digestive de l'azote, ou par la *méthode directe*, en estimant directement les valeurs PDIN et PDIE.

5.2.2. Prédiction des valeurs azotées par la méthode factorielle

Si le coproduit existe dans les tables INRA ou s'il est voisin d'un aliment référencé dans les tables, il est possible de prendre les valeurs DT et dr des tables à condition que le coproduit n'ait pas subi de traitements particuliers.

Si un traitement particulier a été appliqué au coproduit ou si le coproduit n'est pas référencé dans les tables INRA, on ne peut pas prendre les valeurs DT et dr des tables. Il faut alors prédire ces paramètres.

5.2.2.1. Estimation de la dégradabilité théorique

La dégradabilité théorique (DT) est estimée à partir de la dégradabilité enzymatique de l'azote après 1 heure d'incubation *in vitro* dans une solution de protéase (dE1).

Deux modèles de prédiction sont disponibles (Aufrère *et al.*, 1989), établis soit pour différentes matières premières simples en tenant compte d'un effet "famille d'aliments" (Figure 12), soit pour des aliments composés (Figure 13).

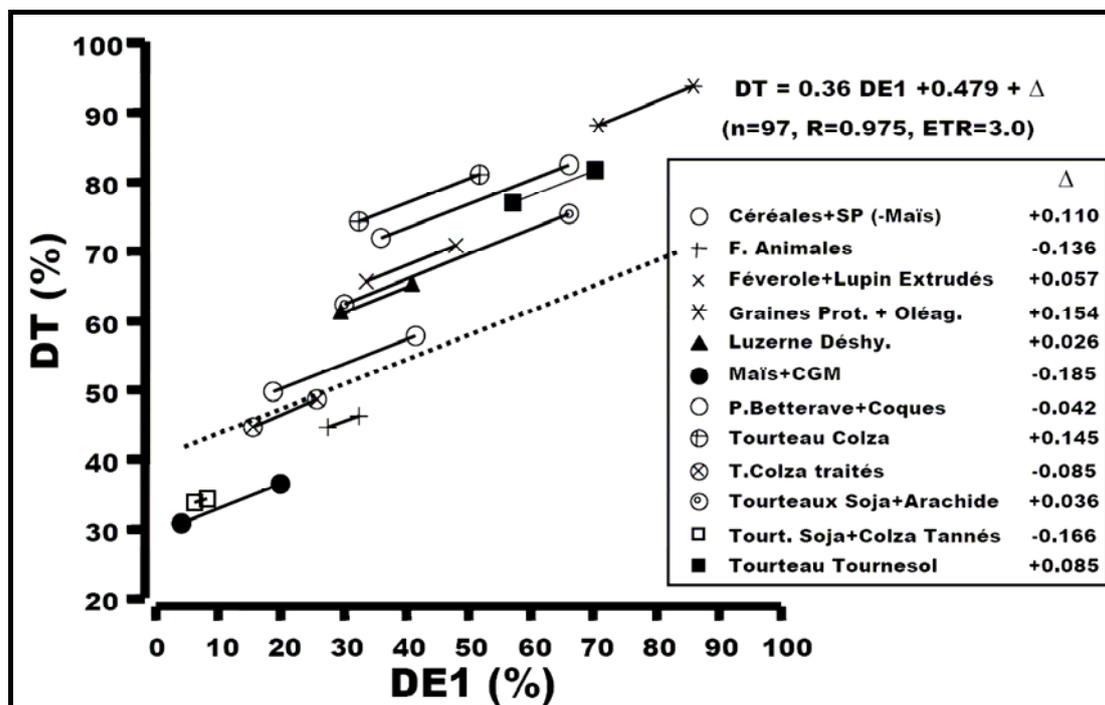


Figure 12 : prédiction de la dégradabilité théorique (DT) de l'azote à partir de la dégradabilité enzymatique (DE1) pour les aliments simples (Aufrère *et al.*, 1989)

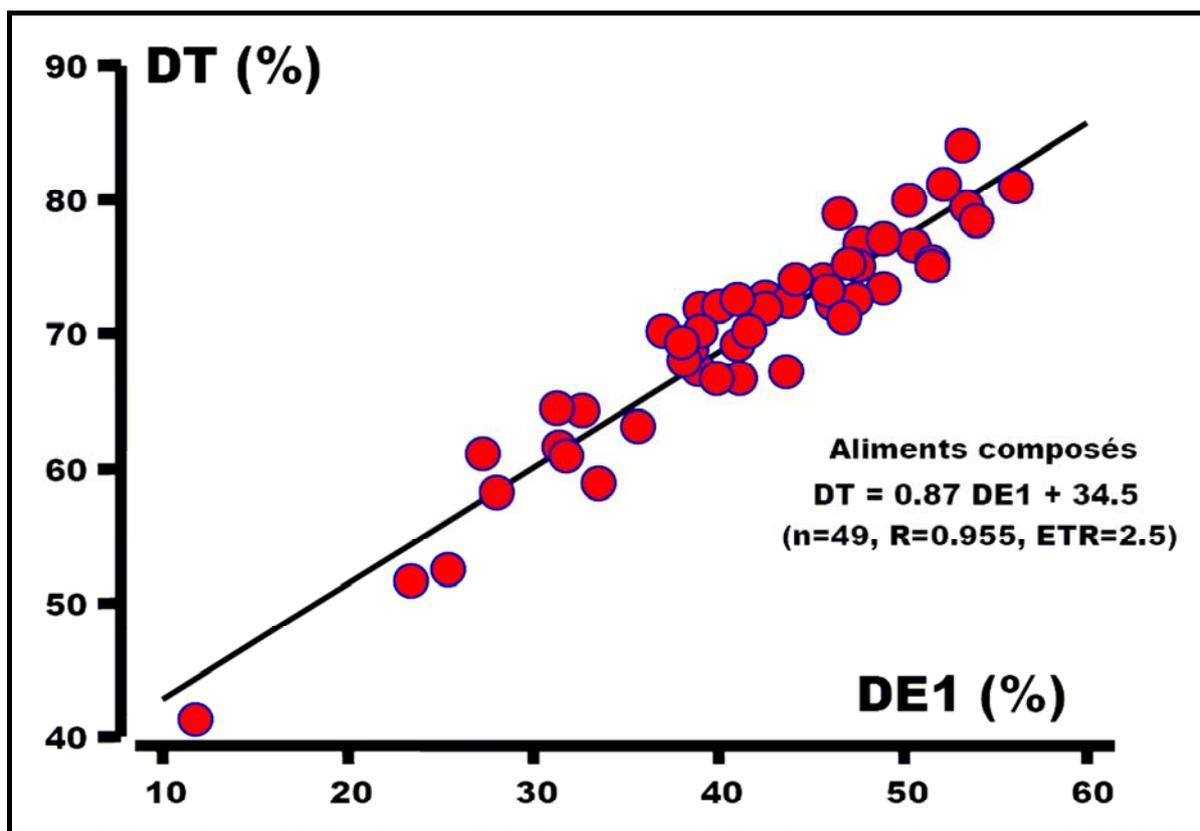


Figure 13 : prédiction de la dégradabilité théorique (DT) de l'azote à partir de la dégradabilité enzymatique (DE1) pour les aliments composés (Aufrère *et al.*, 1989)

5.2.2.2. Estimation de la digestibilité intestinale

La digestibilité intestinale (dr) est plus délicate à estimer. Aucune mesure *in vitro* n'a été développée en vue de sa prédiction. Les tables INRA-AFZ (Tran et Sauvant, 2002 ; Sauvant, Perez et Tran, 2004) proposent une équation de calcul des valeurs dr à partir des teneurs en MAT et ADL en tenant compte de l'importance de la fraction de matière organique non digestible (MOND = 1 - MO x dMO, en %) :

$$dr = 88,3 + 0,371 \text{ MAT} - 0,0037 \text{ MAT}^2 - 1,07 \text{ ADL} - 0,313 \text{ MOND}$$

(n = 69 ; R = 0,95 ; ETR = 4,7)

avec dr exprimée en %, MAT ; ADL et MOND exprimées en % MS

Dans le cas des coproduits n'ayant pas subi de traitements technologiques, cette équation peut être utilisée. Mais ce modèle nécessite donc d'avoir estimé de façon correcte la dMO du coproduit (voir « Prédiction de la digestibilité de la matière organique » : Partie 5).

En revanche, pour les coproduits ayant subi un traitement technologique susceptible de modifier ce critère, il sera nécessaire d'estimer l'importance de cet impact et d'appliquer une correction sur la valeur dr calculée.

5.2.2.3. Estimation de la matière organique fermentescible (MOF)

La teneur en MOF est calculée selon la formule suivante :

$$\text{MOF} = k \times \text{MOD} - \text{MG} - \text{MAT} (1 - \text{DT})$$

(avec MAT, MG, et MOD = MO x dMO en g/kg MS ; $0 \leq \text{DT} \leq 1$)

Pour les coproduits riches en amidon, une pondération de la MOF, par un coefficient k, est appliquée selon le niveau de dégradabilité de cette fraction (Sauvant *et al.*, 2004). Les valeurs de k sont proposées dans le Tableau 7.

Lorsque le coproduit a subi un processus de fermentation lors de son stockage, il est nécessaire de tenir compte de la teneur en produits volatiles (PV) qui diminuent la quantité de MOF.

Tableau 7 : coefficient k applicable à la MOF selon le niveau de dégradabilité de l'amidon des aliments (Sauvant *et al.*, 2004)

Aliments	Coefficient k
Maïs, sorgho, riz	0.60
Pois, féveroles, pulpe de pomme de terre et pommes de terre, manioc, tourteaux et sons de riz, tourteaux et son de maïs	0.80
Autres aliments à plus de 10 % amidon	0.95
Autres aliments	1.00

5.2.2.4. Calcul des valeurs PDIN et PDIE

Les valeurs prédites ci-dessus pour les divers déterminants sont ensuite intégrées dans les équations de base du système PDI afin de calculer les valeurs PDIN et PDIE du coproduit.

Il est recommandé de tester l'incidence d'une légère variation (par exemple ± 1 ET) de la valeur prédite pour les différents critères, notamment pour la DT, sur les valeurs azotées finales PDIN et PDIE.

5.2.3. Estimation directe des valeurs PDIN et PDIE des coproduits

5.2.3.1. À partir de la composition chimique

L'estimation directe des valeurs azotées PDIN peut se faire à partir de la simple connaissance de la teneur en MAT, comme le montre la Figure 14. Les valeurs des tables INRA-AFZ (Sauvant, Perez et Tran, 2004) conduisent à la relation suivante :

$$\text{PDIN} = 0,70 \text{ MAT} \quad (n=129, R^2=0,96, \text{ETR}=26)$$

avec PDIN et MAT exprimées en g/kg MS

En effet, pour une teneur en MAT donnée, les écarts de DT n'influencent que très faiblement la valeur PDIN des coproduits, car l'accroissement du flux de PDIA, par exemple lorsque la DT baisse, est associé à une baisse du flux de PDIMN. Il existe donc un phénomène de compensation entre les fractions alimentaire et microbienne.

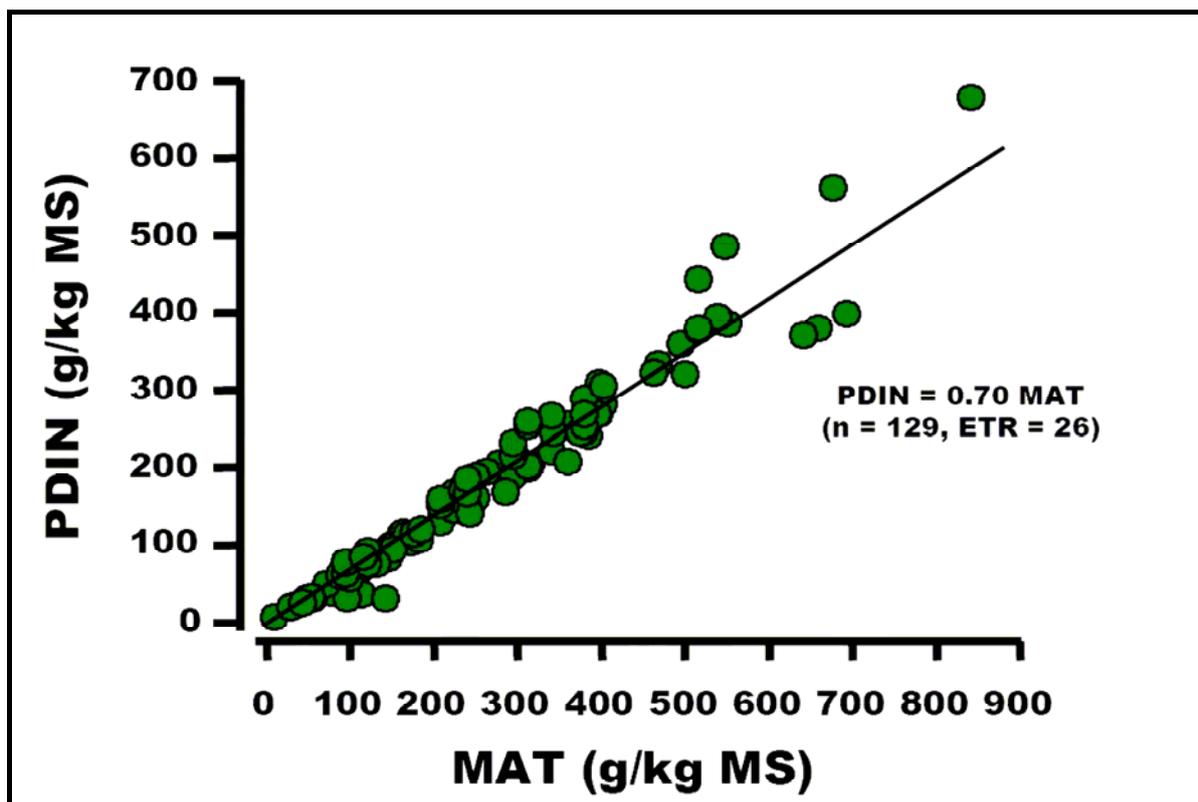


Figure 14 : relation entre la valeur PDIN et la teneur en MAT des aliments
(d'après les données des tables INRA-AFZ, Sauvant *et al.*, 2004)

Le même raisonnement n'est pas applicable à la valeur PDIE (Figure 15). En effet, les variations de DT enregistrées pour une teneur en MAT donnée modifient le flux de PDIA sans pour autant modifier fortement la valeur PDIME, qui ne dépend que de la teneur en MOF, essentiellement influencée par la quantité de glucides pariétaux.

Ainsi, les valeurs PDIE peuvent être prédites à partir des teneurs en MAT et en glucides pariétaux, mais la relation obtenue à partir des données des tables INRA-AFZ (Sauvant, Perez et Tran, 2004) présente une précision plus faible que celle des PDIN :

$$PDIE = 36,4 + 0,46 MAT - 0,15 ADL \quad (n=117, R^2=0,75, ETR=42)$$

avec PDIE, MAT et ADL exprimées en g. kg MS

Cependant cette démarche n'est applicable que lorsque les coproduits n'ont pas subi de traitements pouvant influencer fortement les valeurs de dégradabilité théorique ou de digestibilité intestinale. En effet, les matières premières qui s'écartent le plus de cette relation sont, d'une part, les tourteaux tannés ou toastés, les graines tannées ou extrudées, le corn gluten meal... qui présentent des protéines protégées, et, d'autre part, les vinasses dont l'azote est fortement soluble.

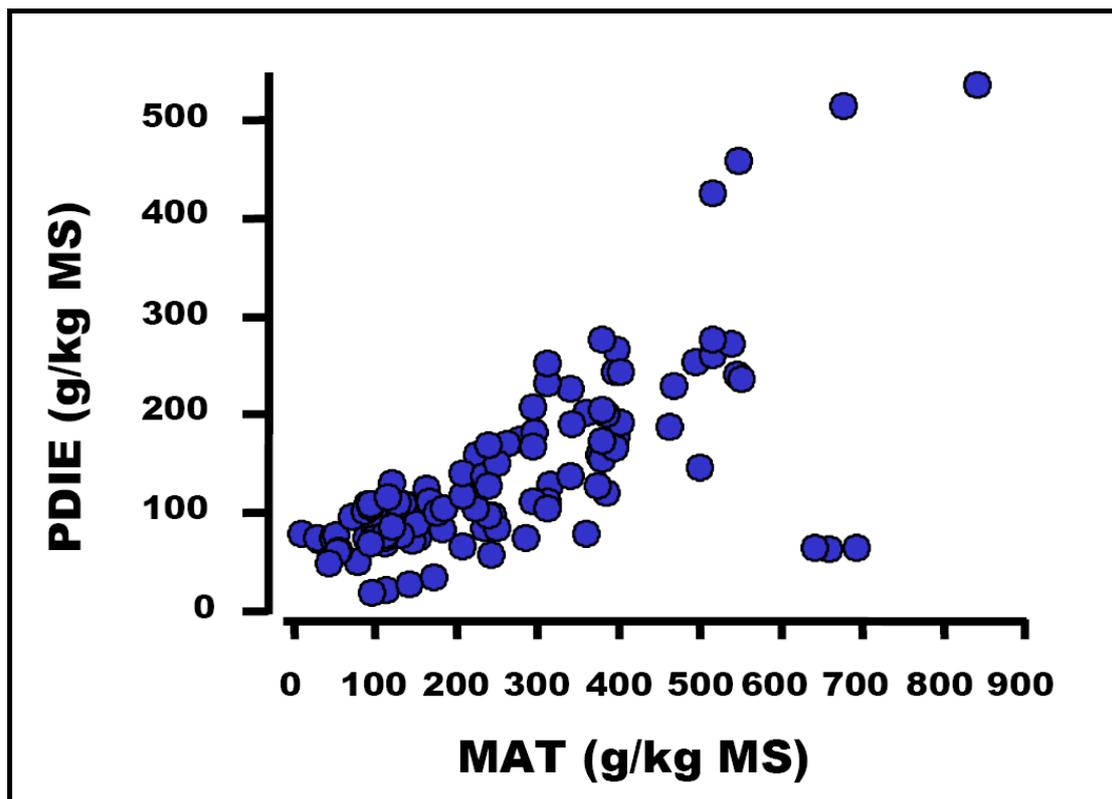


Figure 15 : relation entre la valeur PDIE et la teneur en MAT des aliments (d'après les données des tables INRA-AFZ, Sauvant *et al.*, 2004)

5.2.3.2. À partir de la composition chimique et de la DE1

Lorsque la DT des coproduits n'est pas connue et/ou est susceptible de pouvoir varier suivant les traitements subis, il est préférable de tenir compte, en plus de la teneur en MAT, de la valeur dE1 réellement mesurée pour l'échantillon de coproduit (Aufrère *et al.*, 1989).

Ainsi, les valeurs PDIN et PDIE peuvent être prédites directement à partir des teneurs en matières azotées totales et de la fraction des matières azotées non dégradables par voie enzymatique : $MANDE1 = MAT \times (1 - DE1)$, avec $0 \leq DE1 \leq 1$.

Les modèles de prédiction correspondants sont présentés au Tableau 8.

**Tableau 8 : modèles de prédiction des valeurs azotées pour les aliments simples et composés
(Sauvant *et al.*, 2004)**

Pour les aliments simples :	
PDIA = 0,359 MANDE1 + 0,00060 (MANDE1) ²	(n=97, ETR=20,7)
PDIN = 0,576 MAT + 0,087 MANDE1 + 0,00028 (MANDE1) ²	(n=97, ETR=9,6)
PDIE = 70,4 + 0,285 MANDE1 + 0,00063 (MANDE1) ² ou en estimant la MOD :	(n=97, ETR=20,0)
PDIE = 20,9 + 0,291 MANDE1 + 0,00060 (MANDE1) ² + 0,069 MOD – 0,90 MG	(n=97, ETR=18,0)
Pour les aliments composés :	
PDIA = - 0,211 MAT + 0,84 MANDE1	(n=49, ETR=7,7)
PDIN = 0,507 MAT + 0,278 MANDE1	(n=49, ETR=3,4)
PDIE = 67,1 – 0,22 MAT + 0,802 MANDE1 ou en estimant la MOD :	(n=49, ETR=8,8)
PDIE = - 0,19 MAT + 0,751 MANDE1 + 0,096 MOD – 0,13 MG	(n=49, ETR=7,1)
(dans ces équations, tous les critères sont exprimés en g/kg MS).	

5.2.4. Estimation des valeurs LysDI et MetDI des coproduits

Au-delà des valeurs PDI des aliments, la valeur azotée des coproduits peut être appréciée par les teneurs en acides aminés digestibles dans l'intestin (AADI), notamment les teneurs en LysDI et MetDI pour les deux principaux acides aminés facteurs limitants (Rulquin *et al.*, 2001).

5.3. Calcul de la valeur minérale des coproduits

L'appréciation de la valeur minérale d'un coproduit nécessite de connaître, dans un premier temps, les teneurs en phosphore (P) et calcium (Ca).

Ces fractions minérales ne sont pas en totalité absorbées dans le tube digestif de l'animal. Chez les ruminants, il faut tenir compte d'un coefficient d'absorption réelle (CAR) pour aboutir à la fraction de phosphore absorbable et de calcium absorbable. Les valeurs de ces coefficients, issues des travaux récents (Meschy, 2002 ; Meschy et Corrias, 2005), sont proposées pour les principaux aliments dans les tables INRA-AFZ (Sauvant, Perez et Tran, 2004) et tables INRA (2007).

Le CAR du phosphore varie de 0,60 à 0,70 pour les fourrages et de 0,65 à 0,90 pour les concentrés et coproduits.

Lorsque cette information n'est pas disponible pour un coproduit, il est possible de s'appuyer sur une relation moyenne entre P absorbable et P total (Figure 16), obtenue à partir des données des tables INRA-AFZ (Sauvant, Perez et Tran, 2004) :

P absorbable = 0,70 P total (n = 114, ETR = 0,4)
avec P absorbable (0 < P absorbable < 13) et P total (0 < P total < 20) en g/kg MS.

La pente de cette relation est plus faible (0,50) dans le cas des aliments ou coproduits riches en ligno-cellulose.

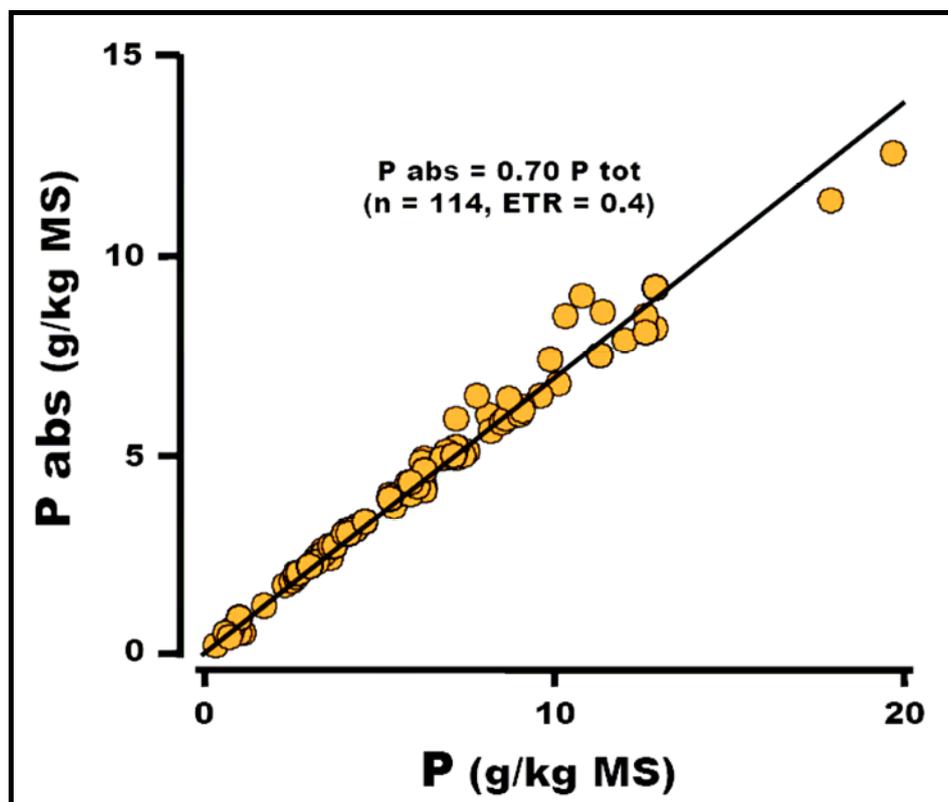


Figure 16 : relation entre les teneurs en phosphore absorbable et phosphore total des aliments (d'après Sauvant *et al.*, 2004)

Le CAR du calcium des fourrages varie de 0,30 (légumineuses) à 0,40 (graminées et céréales). Pour les concentrés, il existe moins de données : il est de 0,75 pour les produits laitiers, d'environ 0,55 pour les céréales et tourteaux et de 0,20 pour les pulpes de betteraves et d'agrumes. La relation entre Ca absorbable et Ca total (INRA, 2007) est moins précise que celle du phosphore (Figure 17) :

Ca absorbable = 0,40 Ca total (n = 117, ETR = 1,4)
avec Ca absorbable (0 < Ca absorbable < 14) et Ca total (0 < Ca total < 37) en g/kg MS.

Par ailleurs, les teneurs en oligo-éléments des coproduits présentent une variabilité importante, que ce soit inter ou intra coproduit. Il en est de même pour les électrolytes, ce qui peut avoir une incidence non négligeable sur leur bilan alimentaire cations-anions (BACA = Na + K - Cl - S) ou leur bilan électrolytique alimentaire (BEA = Na + K - Cl) (Figure 18).

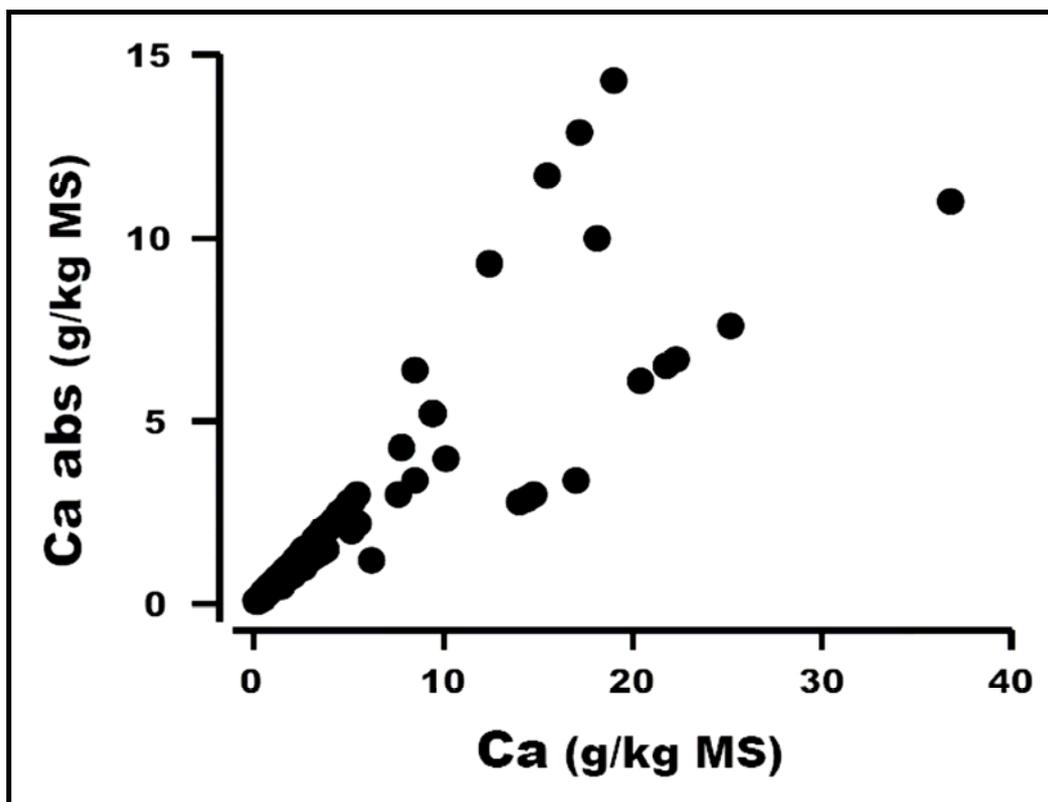


Figure 17 : relation entre les teneurs en calcium absorbable et calcium total des aliments concentrés et coproduits (d'après INRA, 2007)

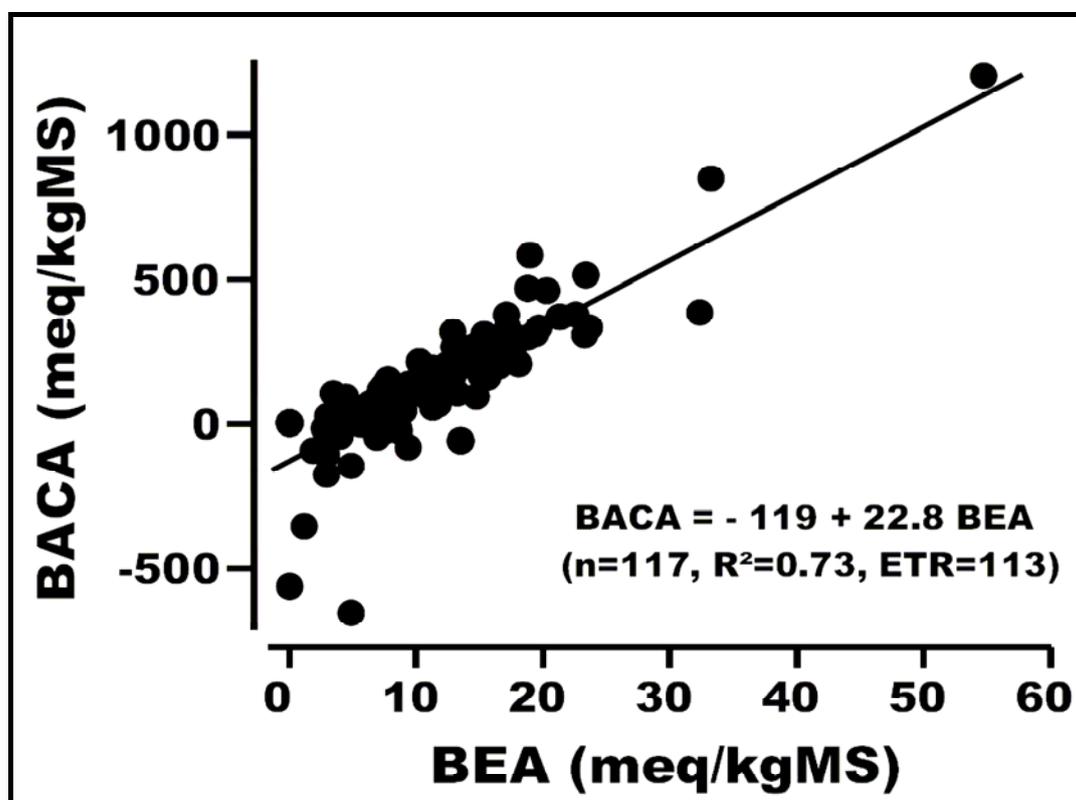


Figure 18 : relation entre les valeurs BACA et BEA des aliments concentrés et coproduits (d'après INRA, 2007)

5.4. Utilisation du logiciel Préalim

Ces démarches d'estimation des valeurs énergétiques et azotées des coproduits s'appuient sur les principaux modèles de prédiction disponibles de façon éparse dans la littérature. Les principaux modèles et équations de calcul ont été regroupés dans une démarche intégrée au sein de l'**application informatisée PrévAlim** qui est proposée par l'INRA avec le **logiciel INRAtion**.

Le principe de la démarche factorielle qui est suivie (Baumont *et al.*, 1999) est présenté dans la Figure 19. Les différentes équations mises en œuvre dans ce logiciel pour les aliments composés sont regroupées dans le Tableau 9.

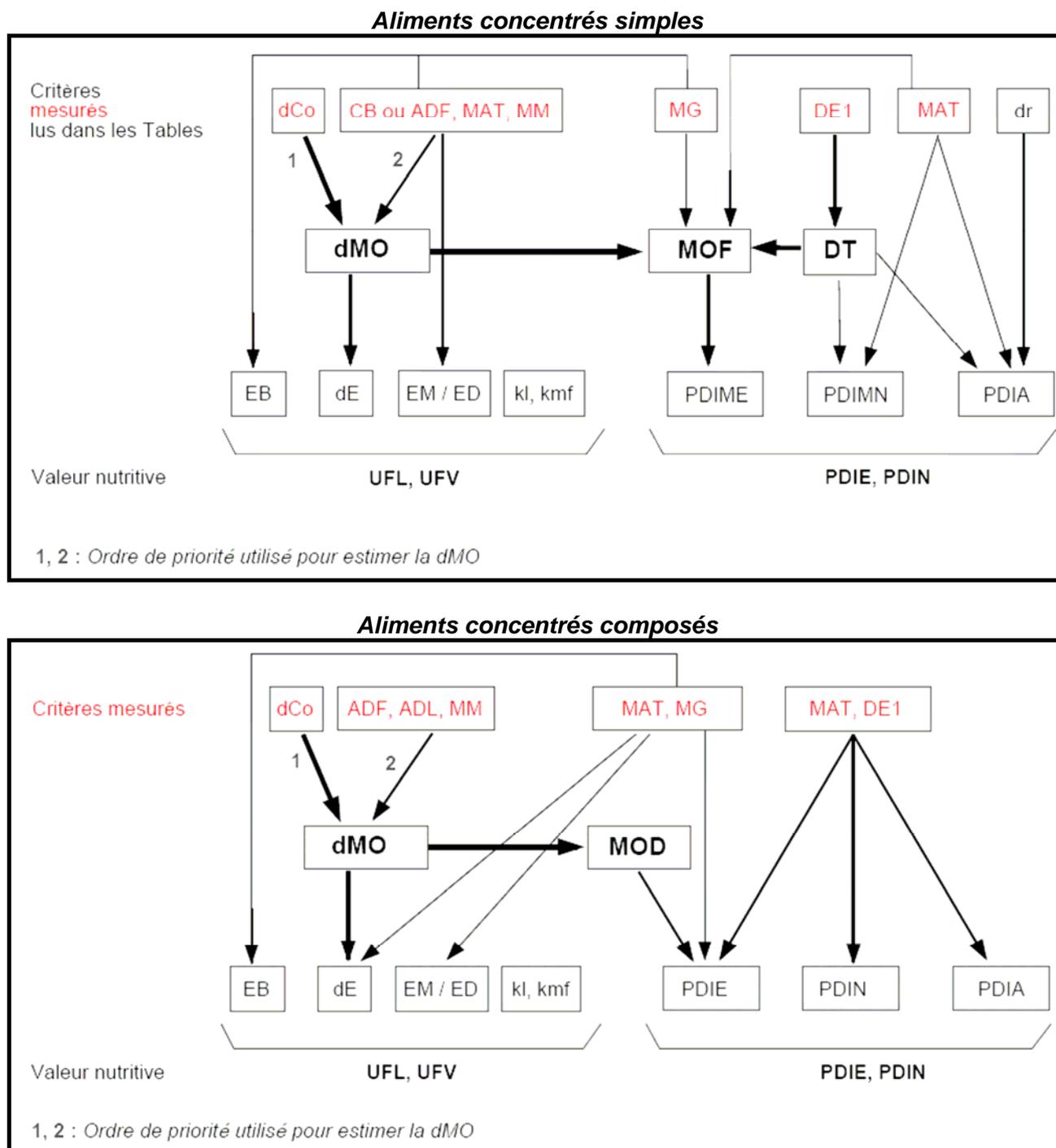


Figure 19 : principes de prédiction des valeurs énergétique et azotée des aliments concentrés proposés dans PrévAlim [voir Tableau 10] (Baumont *et al.*, 1999)

Tableau 9 : récapitulatif des différentes équations proposés dans Prév Alim pour les aliments concentrés (Baumont *et al.*, 1999)

Variables	Caractéristiques de l'équation	Source
<i>dMO des aliments concentrés simples</i>		
dCo	Equation générale	Aufrère et Michalet-Doreau, 1988
dCs ou dCo	Equation spécifique luzerne déshy	Aufrère et Graviou, 1996
CB ou ADF	Céréales et coproduits	Sauvant <i>et al.</i> , 1987
MAT	Tourteaux de soja et de colza	Sauvant <i>et al.</i> , 1987
<i>dMO des aliments composés</i>		
dCo		Giger <i>et al.</i> , 1990
ADF, ADL		Giger <i>et al.</i> , 1990
<i>DT et PDI des aliments concentrés simples et composés</i>		
DE1, MAT		Aufrère <i>et al.</i> , 1989

6. Exemple de démarche de prédiction de la valeur nutritive sur un coproduit d'extraction issu du tourteau de tournesol

Cette démarche de prédiction a été appliquée pour estimer la valeur énergétique et azotée de nombreux coproduits à la demande du Comité des Coproduits (Chapoutot, 2000).

Un exemple de cette démarche est présenté à titre d'illustration, concernant la prévision des valeurs énergétiques et azotées d'un coproduit d'extraction à partir de tourteau de tournesol. Ce coproduit, généré par le Centre de Valorisation des Glucides de Dury-lès-Amiens (80) et appelé dans le texte "tourteau d'extraction CVG", est issu de l'extraction par voie aqueuse et séparation par centrifugation de certaines substances du tourteau de tournesol pour leur utilisation en cosmétique. Le tourteau d'extraction frais est ensuite ensilé.

Le Tableau 10 donne la **composition chimique** de 2 échantillons issus de ce process, l'un frais, l'autre ensilé.

Tableau 10 : composition chimique des tourteaux d'extraction de tournesol

T. de tournesol d'extraction	MS (% brut)	MM (% MS)	MAT (% MS)	CB (% MS)	MGA ³ (% MS)	DE1 (%)	N soluble (%)
Frais	32,4	6,6	28,7	34,1	0,4	33,7	7,1
ensilé	34,0	6,7	31,2	34,0	0,5	37,3	20,3

Résultats obtenus par le Laboratoire Vétérinaire Départemental de la Somme (Dury-Lès-Amiens, 80)

La Figure 20 replace ces tourteaux d'extraction CVG par rapport aux différents types de tourteaux de tournesol recensés dans la Banque de Données de l'Alimentation animale (iO7, 2000). Ils présentent par rapport aux tourteaux courants des teneurs plus élevées en CB (34 % MS vs 5-30 % MS) et, inversement, plus faibles en MAT (30 % MS environ vs 30-50 % MS) sans doute liées au processus d'extraction des substances solubles. La position relative de ces coproduits, légèrement au-dessus de la tendance générale MAT=f(CB), est liée notamment à leur plus faible teneur en MG (0,5 % MS vs 2-15 % MS). L'écart de 2,5 points entre les teneurs en MAT des produits frais et ensilé peut être du à la variabilité d'échantillonnage et reste faible comparativement à la variabilité inter-échantillon inter-laboratoire constatée dans la Banque de Données pour le tourteau de tournesol "générique" (Figure 21). Le traitement en milieu aqueux qui génère ces co-produits explique également les valeurs relativement faibles de solubilité et dégradabilité de l'azote (Figure 22). De façon logique, le produit ensilé présente une fraction azotée soluble plus importante, sans pour autant, cependant, que la DE1 ne soit beaucoup plus élevée.

En l'absence de mesures *in vitro* ou *in vivo*, une estimation de la **valeur énergétique** des tourteaux d'extraction CVG peut être faite à partir de leurs teneurs en CB ou MAT selon les relations globales proposées par Sauvante *et al.*, (1987)⁴ d'après les données des tables INRA (1988) pour les co-produits du tournesol (Figure 23) :

$$UFL = 1,16 - 0,016 \times CB \text{ ou } UFL = 0,10 + 0,018 \times MAT$$

$$UFV = 1,09 - 0,017 \times CB \text{ ou } UFV = -0,01 + 0,018 \times MAT \quad (\text{avec CB et MAT en \% MS}).$$

Les valeurs ainsi estimées sont d'environ 0,60-0,65 UFL/kg MS et 0,50-0,55 UFV/kg MS.

Une démarche analogue permet d'approcher la valeur dMO de ces produits (environ 50 %). Les valeurs UFL et UFV peuvent être ensuite calculées par la méthode INRA, à partir de la composition chimique des échantillons et de la dMO estimée, en calculant l'énergie brute EB par l'équation de Schieman avec

³ Procédé A sans hydrolyse

⁴ Valeur nutritive des aliments concentrés simples : tables et prévision. Bulletin technique de Theix. N°70. Décembre 1987, 75-89

$\Delta = -57$ pour le tourteau de tournesol (INRA, 1978), la digestibilité de l'énergie avec $h = dE - dMO = -0,7$, valeur moyenne pour le tourteau de tournesol (Sauvant *et al.*, 1987) puis les valeurs ED, EM et ENL, ENV. Cette démarche conduit à des valeurs de 0,56 UFL et 0,45 UFV /kg MS.

Les **valeurs azotées** peuvent être calculées dans le système PDI (INRA, 1988). La dégradabilité théorique de l'azote (DT) est estimée à partir des valeurs de DE1 (Aufrère *et al.*, 1989)⁵ en tenant compte d'un écart $\Delta (= DT - DE1)$ de + 8,5 points (valeur pour la famille du tourteau de tournesol) : DT = 69 % environ. Si l'on utilise le modèle général pour les aliments hors classes, les valeurs DT estimées sont assez voisines (63 et 66 %). On retiendra donc les valeurs DT = 65 et 68 % respectivement pour les 2 tourteaux d'extraction CVG frais et ensilé. Les valeurs PDI qui en découlent en supposant une valeur dr identique à celle prise pour le tourteau de tournesol : dr = 85 (INRA, 1988) sont d'environ 200-210 g PDIN /kg MS et 125-130 g PDIE /kg MS. Les valeurs estimées directement par le modèle général à partir des teneurs en MANDE1, MOD et MG sont relativement comparables.

Le Tableau 11 permet de comparer ces produits à différents aliments pour ruminants : par rapport aux autres fourrages, les tourteaux de tournesol d'extraction CVG présentent des valeurs énergétiques relativement faibles mais, à l'inverse, des valeurs azotées plus importantes. Ces tourteaux peuvent être d'intéressants correcteurs azotés de l'ensilage de maïs. Cependant, leur faible valeur énergétique nécessiterait de les associer à des céréales.

Tableau 11 : comparaison des valeurs nutritives des tourteaux d'extraction de tournesol CVG à celles d'autres aliments (tables INRA, 1988)

Aliment	MAT (%MS)	CB (%MS)	UFL (/kgMS)	UFV (/kgMS)	PDIN (g/kgMS)	PDIE (g/kgMS)
Ensilage Maïs	8,8	20,1	0,90	0,84	56	85
Foin Luzerne ⁶	17,4	35,1	0,67	0,58	112	94
Foin de pré ⁷	8,8	35,3	0,63	0,53	55	69
Paille de blé	3,5	42,0	0,42	0,31	22	44
T. Soja 48	52,0	7,0	1,17	1,16	371	254
T. tournesol 35	38,0	22,8	0,81	0,72	245	128
T. de tournesol d'extraction ensilé	30	34	0,55-0,60	0,45-0,50	200-210	125-130

⁵ Aliments concentrés pour ruminants : prévision de la valeur azotée PDI à partir d'une méthode enzymatique standardisée. INRA Production Animale, 1989, 2 (4), 249-254

⁶ 1^{er} cycle bourgeonnement, fané par beau temps

⁷ prairie de Normandie, 1^{er} cycle floraison, fané par beau temps

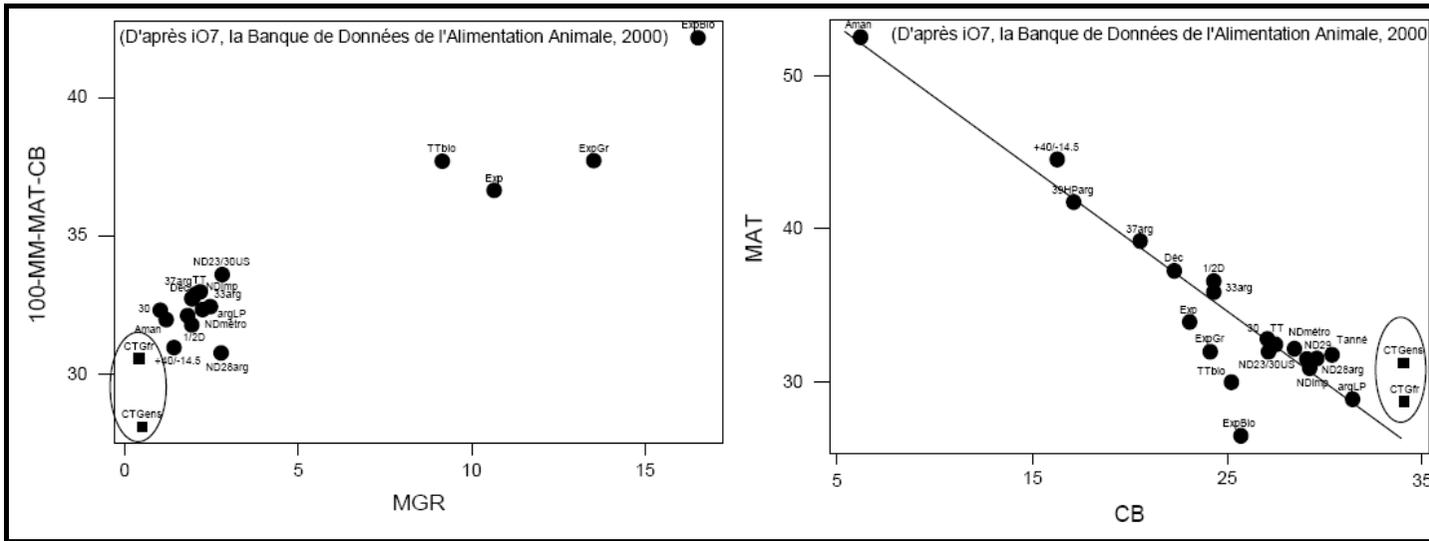


Figure 20 : relations entre les critères chimiques des coproduits de tournesol

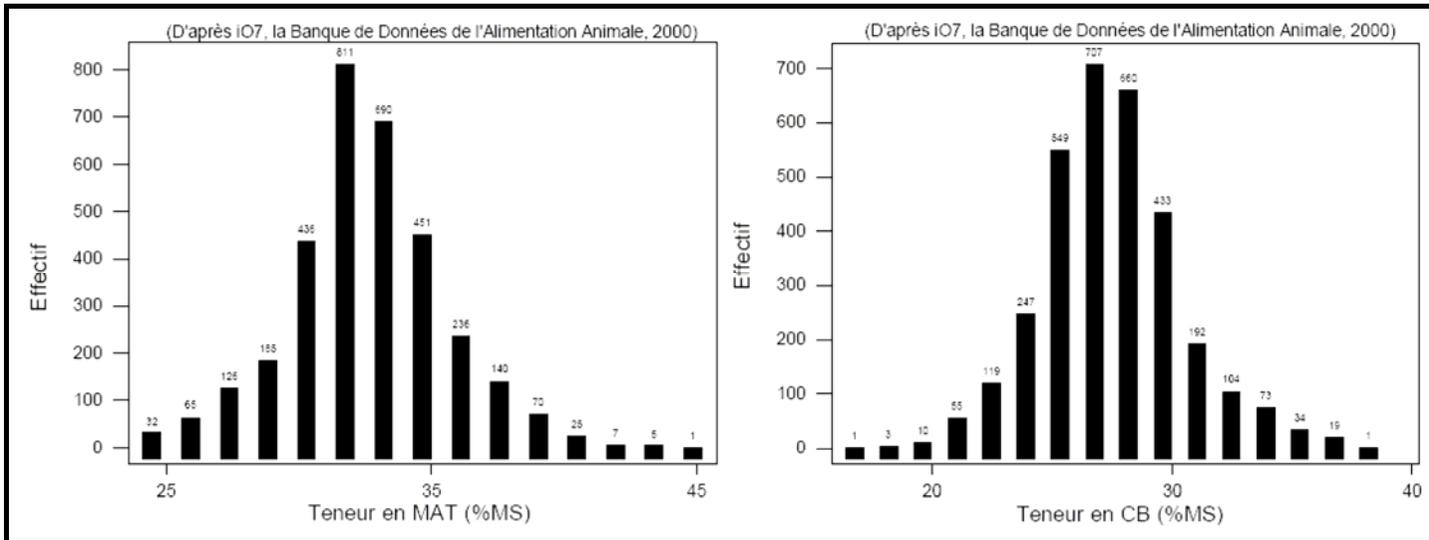


Figure 21 : variabilité de composition chimique du tourteau de tournesol

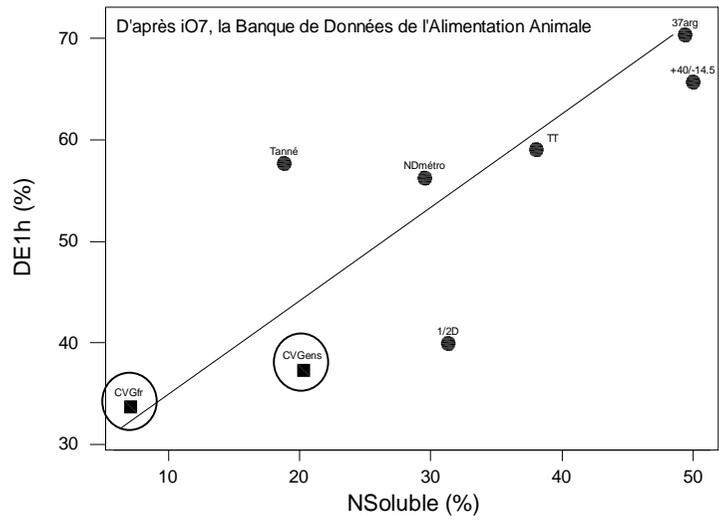


Figure 22 : relation entre la dégradabilité enzymatique et la solubilité de l'azote des tourteaux de tournesol

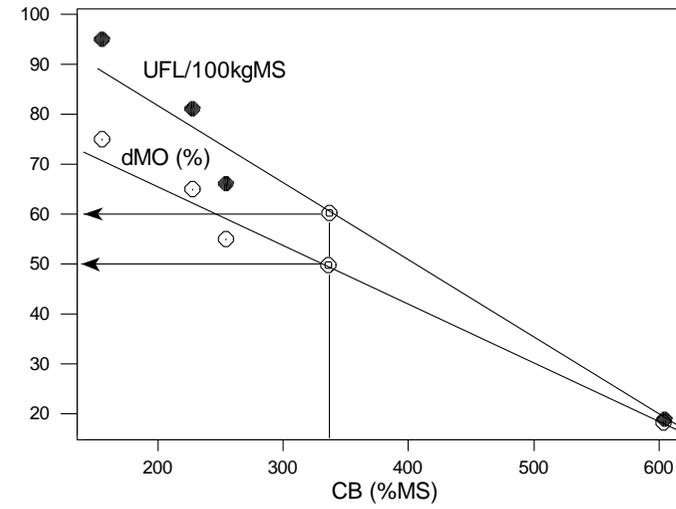


Figure 23 : relation entre la teneur en CB et la digestibilité de la MO ou la valeur UFL des co-produits de tournesol (d'après INRA, 1988)

7. Conclusion

La connaissance de la **valeur nutritive des coproduits** est la première étape indispensable à leur valorisation optimale en alimentation animale.

L'expertise à mettre en place passe avant tout par **l'identification du process d'obtention** du coproduit et de ses différentes phases, qui va conditionner la nature et l'importance relative de ses diverses fractions constitutives.

Il conviendra ensuite, pour mieux préciser l'importance quantitative de ces éléments, de mettre en œuvre un ensemble pertinent d'analyses (chimiques, physiques et/ou *in vitro*) conduisant à la **caractérisation précise de la composition chimique** du coproduit ainsi que la **variabilité de ces critères** observée entre échantillons d'une même usine ou entre différentes usines générant le même type de coproduits.

Cette composition est à rapprocher de celles classiquement observées dans les banques de données et/ou dans les principales tables utilisées en alimentation animale, voire en alimentation humaine.

La variabilité parfois importante de la qualité des coproduits peut éventuellement amener les fournisseurs et les utilisateurs à proposer **un typage plus précis et une segmentation** des coproduits selon leurs teneurs dans les principaux constituants de façon à en améliorer la valorisation potentielle chez les différents types d'animaux.

La **valeur nutritive des coproduits** doit être appréciée dans les systèmes d'unités d'alimentation (énergétique, azotée et minérale) actuellement utilisés chez les animaux ruminants.

Compte tenu de la grande diversité des coproduits, la mise en place systématique de mesures *in vivo* est rarement possible. L'appréciation de la valeur des coproduits passe donc par **l'utilisation de modèles de prédiction**. Il faut donc effectuer le recensement des principaux modèles disponibles dans la littérature et raisonner le choix des modèles les plus pertinents, notamment selon des **critères de précision et de coût** de la prédiction. En l'absence de modèle disponible, les données des tables de composition et de valeurs alimentaires peuvent conduire à une estimation approchée. Dans tous les cas, un raisonnement critique doit être appliqué aux résultats de ces diverses évaluations, en confrontant les valeurs issues des différents modèles et en y associant, dans la mesure du possible, un intervalle de confiance le plus probable selon le risque d'erreur que l'on accepte.

Cependant, la seule détermination de la valeur nutritive des coproduits n'est pas suffisante et doit être complétée par des **mesures sur animaux** indispensables pour juger de l'appétibilité des coproduits, identifier les risques éventuels de modifications de la qualité hygiénique et sanitaire des rations liées à des fractions particulières ou à des molécules indésirables pour la chaîne alimentaires, proposer des limites d'utilisation en conséquence, et enfin connaître l'incidence de leur utilisation sur les performances des animaux, la qualité des produits et les rejets environnementaux.

Annexe

Prélèvement d'échantillons d'aliments dans les exploitations agricoles

L'échantillonnage des aliments (fourrages, grains, aliments composés, aliments liquides...) est l'étape la plus importante du processus d'analyse chimique, en raison des variations qu'elle peut entraîner si elle n'est pas exécutée avec précaution. Les étapes nécessaires à la bonne réalisation d'un tel exercice sont décrites brièvement ci-après.

DEFINITIONS

- **Lot**
Un lot est une quantité d'aliment définie (par exemple en tonnes de fourrage préfané ou d'aliments composés) avec des caractéristiques particulières et uniformes, obtenue dans des conditions identiques (composition botanique, structure physique, date de livraison, de coupe ou de récolte).
- **Echantillon simple**
Un échantillon simple correspond à une quantité de l'ordre de 0,1 à 0,5 kg prélevée en une seule fois à un endroit spécifique du lot. Selon l'homogénéité de l'aliment, le choix des paramètres d'analyse, le volume du lot et le moment de prélèvement, il est possible de former un échantillon représentatif à partir de 3 échantillons simples aussi homogènes que possible.
- **Echantillon global**
Tous les échantillons simples mélangés de manière homogène forment l'échantillon global. Le volume de l'échantillon global varie entre 0,5 kg et 50 kg, en fonction de la grandeur du lot, du gende d'aliment et du moment du prélèvement.
- **Echantillon représentatif**
C'est un échantillon dans lequel on retrouve les caractéristiques du lot d'où il provient. Il pèse de 0,3 à 1,0 kg avec plus de 87 % de matière sèche et de 1,0 à 2,0 kg avec moins de 87 % de matière sèche.

L'échantillon représentatif à envoyer au laboratoire doit être composé d'échantillons simples issus de l'échantillon global. A noter qu'il est possible de former plusieurs échantillons représentatifs à partir d'un échantillon global.

- **Echantillon sélectif**
Dans le cas où la qualité est insatisfaisante, un échantillon dit sélectif doit être prélevé. A cette occasion, le bon aliment doit clairement être séparé du mauvais. Les deux échantillons sélectifs sont envoyés ensemble au laboratoire, ce qui permet d'effectuer une évaluation comparative.

1 – Prélèvements d'échantillons lors de différents procédés d'ensilage et dans différents aliments

La marche à suivre lors du prélèvement d'échantillons doit être adaptée à l'aliment ou au procédé d'ensilage. Le principe reste cependant identique : des échantillons simples sont rassemblés dans un échantillon global réduit par la suite à un échantillon représentatif, lequel est envoyé au laboratoire.

Fourrage lors de l'ensilage

Pendant le déchargement, au moins 5 échantillons simples, si possible de volume égal, sont prélevés par intervalles réguliers sur chaque remorque et mis dans un contenant placé à l'abri du soleil. Les échantillons simples sont réunis en un échantillon global. Celui-ci est ensuite mélangé de manière aussi homogène que possible et réparti de manière uniforme sur une surface propre. Si cela s'avère nécessaire, le fourrage devra être raccourci jusqu'à une longueur de tige maximale de 10 cm.

L'échantillon représentatif, d'un volume de 1 à 1,5 litre, est tiré de l'échantillon global par un nouveau prélèvement d'environ 10 échantillons simples répartis uniformément.

Une analyse chimique du fourrage lors de l'ensilage fournit une première indication par rapport aux nutriments et aux composants. A cette occasion, ni l'influence de la conservation ni celle du stockage ne sont prises en considération.

Ensilage en silo

Les fourrages humides peuvent être échantillonnés à la mise en silo ou une fois fermenté. On conseille cependant d'attendre que l'aliment soit fermenté avant de prendre un échantillon pour fin d'analyse.

En ce qui concerne le silo couvert, environ 2 semaines avant son ouverture, il faut percer à 3 endroits à travers toutes les couches, devant, au centre et à l'extrémité du silo à l'aide d'une sonde spécifique. Les carottes sont ensuite réunies pour former l'échantillon global. Il faut veiller à bien reboucher les trous avec de l'ensilage ainsi qu'à colmater la bâche de couverture de manière étanche.

Pour ce qui est des ensilages sandwichs, c'est à dire lorsqu'il y a plusieurs couches superposées de fourrages, il faut former un échantillon global séparé pour chaque fourrage. Dans ce cas, les carottes seront séparées, afin de constituer un échantillon global pour chaque fourrage.

Si la prise d'échantillon se fait sur le front d'attaque, il faut prélever au moins 5 échantillons simples (de 1 à 2 litres chacun), répartis uniformément dans l'espace et tirés de préférence sur la surface fraîche, et placés dans un contenant de 10 litres. A cet effet, on peut utiliser une pelle, un couteau ou une sonde spécifique. Ces échantillons sont ensuite réunis en un échantillon global.

Ensilage en balles rondes ou rectangulaires

On recommande d'effectuer des prélèvements sur un minimum de 10 balles rondes d'un même lot. Plus le nombre de balles augmente, plus la précision de l'analyse s'améliore. Il faut piquer la sonde sur les côtés ronds de la balle et viser le centre de la balle. Il faut éviter d'échantillonner les parties de fourrages moisies ou qui ne seront pas consommées par les animaux.

Pour un prélèvement dans une balle enrubbannée : faire un prélèvement unique au travers de toutes les couches de la balle grâce à une sonde spécifique (1,0 à 3,5 cm de diamètre) permettant de pénétrer les grosses balles rondes d'un minimum de 45 cm.. Le trou est ensuite rebouché avec du fourrage et le plastique recollé.

On place le contenu de la sonde dans un récipient suffisamment grand pour contenir les 10 échantillons (ou plus), puis après avoir bien mélangé le contenu, on prélève un échantillon d'environ 1 à 1,5 litre que l'on place dans un sac prévu à cet effet.

Pour un prélèvement dans une balle ouverte : au moins 10 échantillons simples sont prélevés manuellement à différents endroits dans toutes les couches et réunis en un échantillon global.

Fourrage sec en tas ou en balles

Ce n'est qu'une fois que le fourrage a fermenté que l'on peut faire des prélèvements à l'aide d'une sonde à fourrage, à 3 endroits au moins.

Prélèvement dans des aliments composés

En général, l'échantillon global correspond à l'échantillon représentatif.

- Prélèvement dans le flux des marchandises lors du déchargement des aliments composés : le prélèvement idéal se fait durant le remplissage du silo, à l'aide d'un volet de séparation spécifique.
- Prélèvement à la sortie du silo : environ 1 semaine avant la prochaine livraison, un échantillon simple est prélevé à l'aide d'un gobelet de mesure à la sortie du silo lors de 3 distributions différentes.

Il est recommandé de prélever des échantillons systématiquement et de les conserver pendant 6 mois dans un local à l'abri de la lumière, de l'humidité et de la chaleur, afin de garantir la traçabilité en cas d'éventuels problèmes.

Prélèvement d'échantillons d'aliments liquides

Lorsqu'ils ont été brassés, les aliments sous forme liquide sont homogènes. Dans ce cas, un échantillon simple est représentatif pour le lot. Il faut utiliser un récipient à large ouverture de 1 à 1,5 litre, qui soit rempli aux $\frac{3}{4}$ en une plongée.

Prélèvement d'échantillons de matières premières en vrac ou emballées

Lors du prélèvement, il faut tenir compte des écarts naturels de qualité dans les aliments simples tels que les céréales. Il faut donc :

- prélever l'échantillon dans le flux de marchandise lors du déchargement ou du transfert à l'aide d'un volet de séparation ou
- effectuer un sondage avec une sonde appropriée à 3 endroits différents, au moins une fois par 4 m² de surface de stockage, à travers l'ensemble du silo.

L'échantillon global correspond à chaque fois à 2,5 kg par 10 tonnes d'aliment.

2 – De quelle manière les échantillons doivent-ils être emballés, étiquetés et envoyés ?

Une fois que les échantillons simples ont été prélevés et réunis en un échantillon représentatif, il faut les emballer, les étiqueter correctement et les envoyer au laboratoire désiré. A cette occasion, il faut tenir compte des points suivants :

- **Etiquetage des échantillons**

Chaque échantillon doit être muni d'une étiquette claire et bien lisible. Il doit être accompagné du formulaire de demande d'analyse. Ce dernier contient les indications détaillées relatives au mandat d'analyse, l'adresse du donneur d'ordre ainsi que son numéro de téléphone, l'adresse e-mail et la date d'expédition.

- **Emballage**

L'emballage doit protéger l'échantillon contre l'air, la lumière, la chaleur et l'humidité. Il faut utiliser uniquement des récipients en plastique propres et hermétiques.

Les échantillons liquides doivent être versés dans des récipients en plastique (pas en PET) à large ouverture étanches et remplis au maximum aux $\frac{3}{4}$. Tous les autres échantillons de fourrage doivent être placés dans des sacs en plastique fermés de manière étanche, dont on aura préalablement évacué l'air.

Les échantillons d'aliments contenant moins de 87 % de matière sèche devraient être refroidis à 4°C pendant 4 heures. Ils doivent parvenir ensuite au laboratoire dans les 24 heures qui suivent le prélèvement.

- **Expédition**

De préférence, les colis doivent être envoyés par la poste du lundi au jeudi, par courrier prioritaire. Ainsi, le colis arrive dans les 24 heures sur place.

Bibliographie

Fournier A., 1999. L'échantillonnage des fourrages. Fiches techniques Bovins laitiers Agri Réseau. www.agrireseau.gc.ca/bovinslaitiers : 4 pages.

Glauser W., 2007. Prélèvement d'échantillons d'aliments dans les exploitations agricoles. Fiche technique destinée à la pratique – ALP actuel, n°30 : 4 pages.

Bibliographie

Aufrère J., Demarquilly C., 1989. Predicting organic matter digestibility of forage by two pepsin-cellulase methods. In : XVI International Grassland Congress, Nice, France, 887-889.

Aufrère J., Graviou D., Demarquilly C., Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., 1989. Aliments concentrés pour ruminants : prévision de la valeur azotée PDI à partir d'une méthode enzymatique standardisée. INRA Prod. Anim., 2, 249-254.

Aufrère J., Andrieu J., Baumont R., Dulphy J.-P., Delaby L., Peccatte. J.-R., 2005. Analyse d'une banque de données de digestibilités mesurées in vivo et par la technique pepsine-cellulase : perspective pour la prévision de la valeur énergétique des fourrages. Renc. Rech. Ruminants 12, 109.

Baumont R., Champciaux P., Agabriel J., Andrieu J., Aufrère J., Michalet-Doreau B., Demarquilly C., 1999. Une démarche intégrée pour prévoir la valeur des aliments pour les ruminants : PrévAlim pour INRAtion. INRA Prod. Anim. 12 (3):183-194

Chapoutot P., 2000. Estimation de la valeur nutritive d'un co-produit d'extraction issu du tourteau de tournesol. 6 p. Comité National des Coproduits. Institut de l'Élevage. 75012 Paris.

Doreau, Peyronnet C., Brunshwig P., Quinsac A., Sauvant D., 2006. Evaluation de la valeur énergétique et azotée des tourteaux gras à partir des valeurs tabulées des graines et des tourteaux classiques. Renc. Rech. Ruminants 13, 108.

Giger-Reverdin S., Aufrère J., Sauvant D., Demarquilly C., Vermorel M., Pochet S., 1990. Prévision de la valeur énergétique des aliments composés pour les ruminants. INRA Prod. Anim., 3, 181-188.

Giger-Reverdin S., Aufrère J., Sauvant D., Demarquilly C., Vermorel M., 1994. Prediction of the energy values of compound feeds for ruminants. Anim. Feed Sci. Technol., 48, 73-98.

INRA, 1978. Alimentation des ruminants. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris.

INRA 1981. Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants. (C. Demarquilly ed.). INRA, Paris, 580 p.

INRA, 1988. Alimentation des bovins, ovins & caprins. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, 471 p.

INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins & caprins. Besoins des animaux – Valeurs des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quae. Versailles, 307 p.

Meschy F., 2002. Recommandations d'apport en phosphore absorbé chez les ruminants. Renc. Rech. Ruminants 9, 279-285.

Meschy F., Corrias R., 2005. Recommandations d'apports alimentaires en calcium et magnésium absorbables pour les ruminants. Renc. Rech. Ruminants 12, 221-224.

Rulquin H., Vérité R., Guinard-Flament J., 2001. Acides aminés digestibles dans l'intestin. Le système AADI et les recommandations d'apport pour la vache laitière. INRA Prod. Anim., 14, 265-274.

Sauvant D., 1981. Prévision de la valeur énergétique des aliments concentrés et composés pour les ruminants. p.237-258, in "Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants" Ed Demarquilly INRA publications, Route de St Cyr, 78000 Versailles.

Sauvant D., Aufrère J. Michalet-Doreau B., Giger S., Chapoutot P., 1987. Valeur nutritive des aliments concentrés simples : tables et prévision. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 75-90.

Sauvant D., Perez J.-M., Tran G. (eds), 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. INRA Éditions et AFZ, Paris. 301 p.

Sauvant D., Chapoutot P., Peyraud J.-L., Meschy F., Doreau B., 2004. Valeurs nutritives pour les ruminants. In " Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons". Coord. D. Sauvant, J.M. Perez & G. Tran, Eds. INRA Éditions et AFZ, Paris, p. 43-50.

Tran G., et Sauvant D., 2002. Données chimiques et de valeur nutritive. In " Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons". Coord. D. Sauvant, J.M. Perez & G. Tran, Eds. INRA Éditions et AFZ, Paris, p. 43-50.

Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C., 1987. Révision du système des protéines digestibles dans l'intestin. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 19-34.

Vermorel M., 1978. Energie. In : R. Jarrige (ed.), Alimentation des ruminants, chapitre 2 : 47 – 88. INRA Paris.

Vermorel M., 1988. Nutrition énergétique. In : R. Jarrige (ed.), Alimentation des bovins, ovins et caprins, chapitre 3 : 57 – 74. INRA Paris.

Guide pour la prévision de la valeur nutritive des coproduits pour les ruminants

La connaissance de la valeur nutritive d'un aliment destiné aux animaux d'élevage est indispensable pour, d'une part garantir une valorisation optimale de ce produit et veiller à l'équilibre de la ration totale, et d'autre part, permettre aux animaux de réaliser de bonnes performances zootechniques. Or, sur le terrain, les caractéristiques de nombreux coproduits proposés aux éleveurs ne sont pas connues. Ce guide se donne donc comme objectif d'apporter une réponse à la question "Quelle valeur nutritive accorder à ce coproduit non référencé ?". L'expertise développée passe en premier lieu par la bonne connaissance du coproduit et du process d'obtention ainsi que par une réflexion sur les différentes analyses à mettre en oeuvre et sur le choix des modèles de prédiction. Dans un second temps, différentes possibilités d'estimation de la valeur énergétique, azotée et minérale des coproduits sont proposées.

collection méthode et outils N&B



Crédit photo : Institut de l'Élevage



Édité par :

Institut de l'Élevage
149, rue de Bercy
75595 Paris cedex 12
www.inst-elevage.asso.fr

Juin 2009

Réf. : 03-09-31-006
ISSN 1779-7829
ISBN 978-2-84148-570-3
Prix : 15 euros

Avec le soutien financier de :

