

15. Formules et équations de prédiction

Roger Daccord, Yves Arrigo et Claude Chaubert

Table des matières

15.	Formules et équations de prédiction	2
15.1	Fourrages.....	2
15.1.1	Equations de prédiction de la digestibilité de la matière organique des fourrages.....	2
15.1.2	Calcul de la valeur énergétique des fourrages.....	10
15.1.3	Calcul de la valeur azotée des fourrages.....	11
15.2	Equations de base pour les aliments simples	13
15.2.1	Calcul de la valeur énergétique des aliments simples	13
15.2.2	Calcul de la valeur azotée des aliments simples	13
15.3	Equation de prédiction pour les aliments composés	14
15.3.1	Calcul de la valeur énergétique des aliments composés	14
15.3.2	Calcul de la valeur azotée des aliments composés	14
15.4	Facteurs de conversion et concordances.....	15
15.5	Bibliographie	16



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie,
de la formation et de la recherche DEFR
Agroscope

15. Formules et équations de prédiction

15.1 Fourrages

Les équations de régression pour prédire la dMO des fourrages sont maintenant basées sur la cellulose brute ou sur la lignocellulose (ADF).

15.1.1 Equations de prédiction de la digestibilité de la matière organique des fourrages

Fourrages des prairies

dMO : digestibilité de la matière organique, %
MAMO : matière azotée, g/kg matière organique
CBMO : cellulose brute, g/kg matière organique
ADFMO : lignocellulose (ADF), g/kg matière organique

Champ application :

MA, g/kg MS : min. 50, max. 280
CB, g/kg MS : min. 130, max. 400
ADF, g/kg MS : min. 170, max. 420
dMO, % : min. 55, max. 84

Précision : Le modèle mathématique utilisé ne donne pas d'indications sur la précision réelle des équations de prédiction. Celle-ci est du même ordre que celle donnée dans le Livre Vert (RAP 1999), soit un écart-type de 2 avec un coefficient de détermination (R²) variant de 0.70 pour les types G à 0.50 pour les types D (DF et DT).

Attention : les équations de prédiction basées sur une composition botanique indéterminée surestiment la dMO des fourrages provenant de prairies riches en légumineuses (type L) et riches en autres plantes (types DF et DT).

Corrections pour le cycle (pousses et repousses) et le stade : Si l'échantillon d'herbe ou de ses conserves provient d'un cycle de végétation et d'un stade déterminé (1er cycle = pousses ; 2e cycle et suivants = repousses), la dMO estimée à partir des équations de prédiction ci-dessous peut être corrigée selon le tableau 15.1. Pour des stades supérieurs on applique les corrections du stade 5. Ces corrections sont valables aussi bien pour l'herbe que ses conserves.

Tableau 15.1. Correction de la dMO selon le cycle de végétation et le stade de développement

Types		Unités correctives*									
		Pousses					Repousses				
		Stade 1	Stade 2	Stade 3	Stade 4	Stade 5	Stade 1	Stade 2	Stade 3	Stade 4	Stade 5
G	prairies riches en graminées	5	5	4	3	0	-2	-2	-2	-2	-3
G_R	prairies riches en graminées dominées par les ray-grass	6	6	5	5	3	-1	-1	-2	-4	-4
E	prairies équilibrées	4	4	4	3	0	-2	-2	-3	-3	-3
E_R	prairies équilibrées dominées par les ray-grass	5	5	5	5	2	-1	-1	-2	-3	-3
L	prairies riches en légumineuses	3	4	5	5	3	2	1	0	0	-1
D_F	prairies riches en autres plantes à feuilles fines	3	3	3	3	2	-2	-2	-2	-2	-4
D_T	prairies riches en autres plantes à tiges grossières	2	2	2	-1	-5	1	-1	-4	-6	-11
Ind.	Composition botanique indéterminée	5	5	5	4	4	-3	-3	-4	-3	-3

* unités à ajouter ou à soustraire à la dMO calculée.

Si le stade n'est pas connu on estime un facteur de correction en fonction de l'herbe et de ses conserves. Pour l'herbe, l'ensilage d'herbe et l'herbe déshydratée artificiellement on prendra la moyenne des corrections des stades 2 et 3 ; pour le fourrage sec la moyenne des corrections des stades 3 et 4.

Fourrage vert des prairies

1.1 G : prairies riches en graminées

$$dMO = 34.0 + 0.1654 MA_{MO} + 0.1776 CB_{MO} - 0.000257 MA_{MO}^2 - 0.000391 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 25.7 + 0.1654 MA_{MO} + 0.2169 ADF_{MO} - 0.000256 MA_{MO}^2 - 0.000413 ADF_{MO}^2$$

1.2 GR : prairies riches en graminées dominées par les ray-grass

$$dMO = 21.9 + 0.1209 MA_{MO} + 0.3580 CB_{MO} - 0.000186 MA_{MO}^2 - 0.000794 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 13.3 + 0.1209 MA_{MO} + 0.3823 ADF_{MO} - 0.000186 MA_{MO}^2 - 0.000746 ADF_{MO}^2$$

1.3 E : prairies équilibrées

$$dMO = 40.6 + 0.1599 MA_{MO} + 0.1431 CB_{MO} - 0.000248 MA_{MO}^2 - 0.000351 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 32.3 + 0.1599 MA_{MO} + 0.1866 ADF_{MO} - 0.000248 MA_{MO}^2 - 0.000382 ADF_{MO}^2$$

1.4 ER : prairies équilibrées dominées par les ray-grass

$$dMO = 43.2 + 0.0859 MA_{MO} + 0.2559 CB_{MO} - 0.000132 MA_{MO}^2 - 0.000678 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 34.4 + 0.0863 MA_{MO} + 0.2914 ADF_{MO} - 0.000133 MA_{MO}^2 - 0.000647 ADF_{MO}^2$$

1.5 L : prairies riches en légumineuses

$$dMO = 86.0 - 0.000231 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 87.4 - 0.000179 ADF_{MO}^2$$

1.6 DF : prairies riches en autres plantes à feuilles fines

$$dMO = 58.9 + 0.0792 MA_{MO} + 0.1320 CB_{MO} - 0.000121 MA_{MO}^2 - 0.000428 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 48.6 + 0.0779 MA_{MO} + 0.2008 ADF_{MO} - 0.000118 MA_{MO}^2 - 0.000487 ADF_{MO}^2$$

1.7 DT : prairies riches en autres plantes à tiges grossières

$$dMO = 43.6 + 0.1806 MA_{MO} + 0.1384 CB_{MO} - 0.000298 MA_{MO}^2 - 0.000475 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 35.2 + 0.1813 MA_{MO} + 0.1512 ADF_{MO} - 0.000299 MA_{MO}^2 - 0.000311 ADF_{MO}^2$$

1.8 Ind : prairies dont la composition botanique est indéterminée

$$dMO = 56.7 + 0.1262 MA_{MO} + 0.0939 CB_{MO} - 0.000231 MA_{MO}^2 - 0.000312 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 54.8 + 0.1121 MA_{MO} + 0.1221 ADF_{MO} - 0.000207 MA_{MO}^2 - 0.000335 ADF_{MO}^2$$

Fourrage ensilé des prairies

2.1 G : prairies riches en graminées

$$dMO = 26.3 + 0.1653 MA_{MO} + 0.2041 CB_{MO} - 0.000241 MA_{MO}^2 - 0.000419 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 10.8 + 0.1652 MA_{MO} + 0.2793 ADF_{MO} - 0.000240 MA_{MO}^2 - 0.000484 ADF_{MO}^2$$

2.2 GR : prairies riches en graminées dominées par les ray-grass

$$dMO = 10.4 + 0.1206 MA_{MO} + 0.4102 CB_{MO} - 0.000174 MA_{MO}^2 - 0.000849 CB_{MO}^2$$

$$dMO = -9.4 + 0.1206 MA_{MO} + 0.4916 ADF_{MO} - 0.000174 MA_{MO}^2 - 0.000872 ADF_{MO}^2$$

2.3 E : prairies équilibrées

$$dMO = 34.1 + 0.1596 MA_{MO} + 0.1653 CB_{MO} - 0.000233 MA_{MO}^2 - 0.000376 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 19.4 + 0.1596 MA_{MO} + 0.2424 ADF_{MO} - 0.000232 MA_{MO}^2 - 0.000447 ADF_{MO}^2$$

2.4 ER : prairies équilibrées dominées par les ray-grass

$$dMO = 34.9 + 0.0857 MA_{MO} + 0.2967 CB_{MO} - 0.000124 MA_{MO}^2 - 0.000724 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 16.9 + 0.0864 MA_{MO} + 0.3815 ADF_{MO} - 0.000125 MA_{MO}^2 - 0.000755 ADF_{MO}^2$$

2.5 L : prairies riches en légumineuses

$$dMO = 85.8 - 0.000229 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 88.3 - 0.000181 ADF_{MO}^2$$

2.6 DF : prairies riches en autres plantes à feuilles fines

$$dMO = 54.0 + 0.0780 MA_{MO} + 0.1557 CB_{MO} - 0.000111 MA_{MO}^2 - 0.000457 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 36.1 + 0.0759 MA_{MO} + 0.2680 ADF_{MO} - 0.000107 MA_{MO}^2 - 0.000572 ADF_{MO}^2$$

2.7 DT : prairies riches en autres plantes à tiges grossières

$$dMO = 37.4 + 0.1809 MA_{MO} + 0.1622 CB_{MO} - 0.000280 MA_{MO}^2 - 0.000500 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 24.2 + 0.1819 MA_{MO} + 0.1929 ADF_{MO} - 0.000282 MA_{MO}^2 - 0.000355 ADF_{MO}^2$$

2.8 Ind : prairies dont la composition botanique est indéterminée

$$dMO = 51.8 + 0.1275 MA_{MO} + 0.1116 CB_{MO} - 0.000219 MA_{MO}^2 - 0.000333 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 45.7 + 0.1145 MA_{MO} + 0.1661 ADF_{MO} - 0.000199 MA_{MO}^2 - 0.000390 ADF_{MO}^2$$

Fourrage sec des prairies (foin et regain)

3.1 G : prairies riches en graminées

$$dMO = 28.5 + 0.1769 MA_{MO} + 0.1730 CB_{MO} - 0.000313 MA_{MO}^2 - 0.000351 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 20.4 + 0.1769 MA_{MO} + 0.2090 ADF_{MO} - 0.000312 MA_{MO}^2 - 0.000371 ADF_{MO}^2$$

3.2 GR: prairies riches en graminées dominées par les ray-grass

$$dMO = 14.8 + 0.1292 MA_{MO} + 0.3494 CB_{MO} - 0.000226 MA_{MO}^2 - 0.000713 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 6.6 + 0.1292 MA_{MO} + 0.3694 ADF_{MO} - 0.000226 MA_{MO}^2 - 0.000670 ADF_{MO}^2$$

3.3 E : prairies équilibrées

$$dMO = 35.1 + 0.1710 MA_{MO} + 0.1408 CB_{MO} - 0.000302 MA_{MO}^2 - 0.000315 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 26.9 + 0.1711 MA_{MO} + 0.1809 ADF_{MO} - 0.000302 MA_{MO}^2 - 0.000343 ADF_{MO}^2$$

3.4 ER : prairies équilibrées dominées par les ray-grass

$$dMO = 35.8 + 0.0920 MA_{MO} + 0.2539 CB_{MO} - 0.000162 MA_{MO}^2 - 0.000609 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 27.3 + 0.0924 MA_{MO} + 0.2846 ADF_{MO} - 0.000162 MA_{MO}^2 - 0.000581 ADF_{MO}^2$$

3.5 L : prairies riches en légumineuses

$$dMO = 80.4 - 0.000189 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 81.6 - 0.000149 ADF_{MO}^2$$

3.6 DF : prairies riches en autres plantes à feuilles fines

$$dMO = 52.2 + 0.0845 MA_{MO} + 0.1341 CB_{MO} - 0.000147 MA_{MO}^2 - 0.000385 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 41.7 + 0.0829 MA_{MO} + 0.1981 ADF_{MO} - 0.000143 MA_{MO}^2 - 0.000439 ADF_{MO}^2$$

3.7 DT : prairies riches en autres plantes à tiges grossières

$$dMO = 37.6 + 0.1940 MA_{MO} + 0.1411 CB_{MO} - 0.000363 MA_{MO}^2 - 0.000425 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 29.9 + 0.1947 MA_{MO} + 0.1464 ADF_{MO} - 0.000365 MA_{MO}^2 - 0.000278 ADF_{MO}^2$$

3.8 Ind : prairies dont la composition botanique est indéterminée

$$dMO = 50.6 + 0.1360 MA_{MO} + 0.0952 CB_{MO} - 0.000282 MA_{MO}^2 - 0.000280 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 48.5 + 0.1210 MA_{MO} + 0.1214 ADF_{MO} - 0.000254 MA_{MO}^2 - 0.000300 ADF_{MO}^2$$

Fourrage déshydraté des prairies

4.1 G : prairies riches en graminées

$$dMO = 65.3 + 0.0869 MA_{MO} + 0.0692 CB_{MO} - 0.000175 MA_{MO}^2 - 0.000299 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 57.4 + 0.1132 MA_{MO} + 0.1171 ADF_{MO} - 0.000271 MA_{MO}^2 - 0.000336 ADF_{MO}^2$$

4.2 GR : prairies riches en graminées dominées par les ray-grass

$$dMO = 63.8 + 0.1905 CB_{MO} - 0.000602 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 41.4 + 0.3186 ADF_{MO} - 0.000707 ADF_{MO}^2$$

4.3 E : prairies équilibrées

$$dMO = 80.8 + 0.0383 CB_{MO} - 0.000285 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 66.4 + 0.1432 ADF_{MO} - 0.000404 ADF_{MO}^2$$

4.4 ER : prairies équilibrées dominées par les ray-grass

$$dMO = 63.2 + 0.1888 CB_{MO} - 0.000610 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 42.7 + 0.3090 ADF_{MO} - 0.000697 ADF_{MO}^2$$

4.5 L : prairies riches en légumineuses

$$dMO = 74.8 + 0.0693 CB_{MO} - 0.000363 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 68.3 + 0.1159 ADF_{MO} - 0.000360 ADF_{MO}^2$$

4.6 DF : prairies riches en autres plantes à feuilles fines

$$dMO = 70.2 + 0.1057 CB_{MO} - 0.000414 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 50.21 + 0.2478 ADF_{MO} - 0.000582 ADF_{MO}^2$$

4.7 DT : prairies riches en autres plantes à tiges grossières

$$dMO = 56.6 + 0.1229 MA_{MO} + 0.1021 CB_{MO} - 0.000237 MA_{MO}^2 - 0.000459 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 48.4 + 0.2396 MA_{MO} + 0.0452 ADF_{MO} - 0.000507 MA_{MO}^2 - 0.000200 ADF_{MO}^2$$

4.8 Ind : prairies dont la composition botanique est indéterminée

$$dMO = 48.6 + 0.1603 MA_{MO} + 0.0710 CB_{MO} - 0.000344 MA_{MO}^2 - 0.000250 CB_{MO}^2$$

$$dMO = 42.8 + 0.1450 MA_{MO} + 0.1241 ADF_{MO} - 0.000320 MA_{MO}^2 - 0.000305 ADF_{MO}^2$$

Fourrages des espèces fourragères en culture pure

Champ d'application :

MA, g/kg MS :	min. 50	max. 320
CB, g/kg MS:	min. 130	max. 410
ADF, g/kg MS :	min. 150	max. 450
dMO, % :	min. 45	max. 87

Précision : Comme pour le fourrage des prairies, le modèle mathématique utilisé ne donne pas d'indications sur la précision réelle des équations de prédiction. Celle-ci est de l'ordre de 2 à 4 pour l'écart-type avec un coefficient de détermination (R^2) variant de 0.80 à 0.60 selon les espèces et les cycles.

Attention : les équations de prédiction sont sensibles au rapport entre les teneurs en MA et CB ou ADF. Si ce rapport de l'échantillon à évaluer s'écarte trop de celui des tables, il se peut que l'estimation de la dMO soit incorrecte.

Corrections de la dMO selon le cycle de végétation et le stade de développement (pousses et repousses)

Si l'échantillon de l'espèce fourragère provient d'un cycle de végétation et d'un stade de développement déterminés (1^{er} cycle = pousses ; 2^e cycle et suivants = repousses), la dMO estimée à partir des équations de prédiction ci-dessous peut être corrigée selon le tableau 15.2.

Si le stade n'est pas connu on estime un facteur de correction en fonction de l'herbe et de ses conserves. Pour l'herbe, l'ensilage d'herbe et l'herbe déshydratée artificiellement on prendra la moyenne des corrections des stades 2 et 3 ; pour le fourrage sec la moyenne des corrections des stades 3 et 4. Ces corrections sont valables aussi bien pour le fourrage vert que ses conserves.

Tableau 15.2. Correction de la dMO selon le cycle de végétation et le stade de développement

Types		Unités correctives*									
		Pousses					Repousses				
		Stade 1	Stade 2	Stade 3	Stade 4	Stade 5	Stade 1	Stade 2	Stade 3	Stade 4	Stade 5
DG	Dactyle	-2	0	3	5	4	1	0	0	-3	-2
LP	Ray-grass anglais	-2	0	3	5	5	-1	-2	-4	-4	-4
LM	Ray-grass italien	-3	-1	3	4	-2	0	3	4	2	-3
AP	Vulpin	0	5	3	2	0	-2	-3	-3	-3	-3
TP	Trèfle blanc	2	3	3	2	1	1	1	1	0	-3
TR	Trèfle violet	0	3	3	2	0	-2	-1	-1	-1	-3
MS	Luzerne	1	1	1	1	1	-3	-2	-1	-2	-1

* unités à ajouter ou à soustraire à la dMO calculée.

Fourrage vert en culture pure

1.9 Dactyle

$$\text{dMO} = 93.6 - 0.000221 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 96.3 - 0.000212 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

1.10 Ray-grass anglais

$$\text{dMO} = 95.5 + 0.0122 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000316 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 98.3 + 0.0013 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000279 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

1.11 Ray-grass d'Italie

$$\text{dMO} = 101.7 - 0.000446 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 101.1 - 0.000339 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

1.12 Vulpin

$$\text{dMO} = 90.1 + 0.0414 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000309 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 98.6 + 0.0144 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000282 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

1.13 Trèfle blanc

$$\text{dMO} = 58.2 + 0.0732 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000022 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 61.7 + 0.0642 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000030 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

1.14 Trèfle violet

$$\text{dMO} = 78.8 + 0.000047 \text{ MA}_{\text{MO}}^2 - 0.000154 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 80.2 + 0.000041 \text{ MA}_{\text{MO}}^2 - 0.000118 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

1.15 Luzerne

$$\text{dMO} = 52.4 + 0.0898 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000062 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 56.7 + 0.0796 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000060 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

Fourrage ensilé en culture pure

2.9 Dactyle

$$\text{dMO} = 94.5 - 0.000225 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 99.2 - 0.000224 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

2.10 Ray-grass anglais

$$\text{dMO} = 101.5 - 0.000352 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 102.2 - 0.000293 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

2.11 Ray-grass d'Italie

$$\text{dMO} = 103.8 - 0.000449 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 104.1 - 0.000341 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

2.12 Vulpin

$$\text{dMO} = 86.1 + 0.0573 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000291 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 101.8 + 0.0173 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000293 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

2.13 Trèfle blanc

$$\text{dMO} = 86.5 - 0.000261 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 87.1 - 0.000152 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

2.14 Trèfle violet

$$\text{dMO} = 82.5 - 0.000189 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 84.1 - 0.000141 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

2.15 Luzerne

$$\text{dMO} = 72.3 + 0.0249 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000128 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 65.3 + 0.0517 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.000088 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

Fourrage sec en culture pure (foin et regain)

3.9 Dactyle

$$\text{dMO} = 87.6 - 0.000187 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 90.1 - 0.000180 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

3.10 Ray-grass anglais

$$\text{dMO} = 93.5 - 0.000291 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 92.3 - 0.000236 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

3.11 Ray-grass d'Italie

$$\text{dMO} = 95.5 - 0.000370 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 93.9 - 0.000277 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

3.12 Vulpin

$$\text{dMO} = 98.0 - 0.000322 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 95.8 - 0.000249 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

3.13 Trèfle blanc

$$\text{dMO} = 81.0 - 0.000216 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 80.9 - 0.000129 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

3.14 Trèfle violet

$$\text{dMO} = 77.6 - 0.000156 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 78.3 - 0.000116 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

3.15 Lucerne

$$\text{dMO} = 76.8 - 0.000131 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 78.1 - 0.000107 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

Fourrage déshydraté en culture pure

4.9 Luzerne

$$\text{dMO} = 78.7 - 0.000149 \text{ CB}_{\text{MO}}^2$$

$$\text{dMO} = 80.8 - 0.000118 \text{ ADF}_{\text{MO}}^2$$

Maïs plante

Malgré la vaste expansion de la culture du maïs, l'estimation précise de la valeur alimentaire (valeur nutritive et ingestibilité) de la plante entière reste encore problématique. Le plus souvent, on se contente d'utiliser sa valeur énergétique standard (6.5 MJ NEL ou 6.8 MJ NEV par kg de MS pour l'ensilage), alors que la plante (variété et stade de végétation) et les conditions de milieu (lieu et année) sont très hétérogènes.

La valeur énergétique du maïs plante entière dépend fortement de sa dMO. Ses principaux facteurs de variation sont la teneur en amidon dont la digestibilité est élevée et pratiquement constante (> 90 %) et la teneur en constituants pariétaux (CB et NDF) dont la digestibilité peut varier largement (45 à 75 % ; Andrieu et Baumont, 2000 ; Barrière et Emile, 2000 ; Daccord et al. 1996 ; Herter et al. 1996). Comme les parois (NDF) représentent presque la moitié de la MS de la plante, la teneur en parois indigestibles est le principal facteur de variation de sa dMO. Malheureusement, la prévision en laboratoire de la digestibilité de cette fraction est difficile et coûteuse si on ne dispose pas d'une méthode basée sur la spectrophotométrie dans le proche infrarouge (SPIR). Il reste les critères chimiques facilement analysables, mais il faut être conscient que ceux-ci ne permettent pas une estimation précise de la dMO de la plante entière de maïs.

Equations de prédiction de la digestibilité de la matière organique du maïs plante entière ou non plante entière (plante partielle ou enrichie)

Equations de prédiction pour le maïs plante entière

De nombreuses équations pour prédire la dMO ont été publiées. Parmi les plus récentes, on peut citer celles d'Andrieu et Baumont (2000) et de Baumont (2006 communication personnelle) :

(Équation 1) $dMO = 79.4 + 0.0652 MA_{MO} - 0.0591 CB_{MO}$

$R^2 = 0.40$; écart-type résiduel = 2

(Équation 2) $dMO = 75.7 + 0.0701 MA_{MO} + 0.0156 NDF_{MO} - 0.0720 ADF_{MO}$

$R^2 = 0.41$; écart-type résiduel = 2

A cause de leur précision relativement faible, ces équations sont valables aussi bien pour la plante verte que pour la plante ensilée et déshydratée. Elles livrent des valeurs en moyenne voisines de celles résultant des équations pour estimer la dMO de l'ensilage de maïs publiées par Daccord et al. (1996).

Un travail de synthèse réalisé en 2012 sur les déterminations de la dMO *in vivo* étudiées à Agroscope prenant en compte 124 maïs avec 534 valeurs individuelles, laisse envisager une amélioration de l'estimation par la prédiction de la matière organique digestible (MOD= MO x dMO/100) comme suit :

- Soit en corrigeant la MOD calculée avec la dMO estimée par l'équation 1

$$MOD_{\text{corrigée}} = 1.2812 \times (dMO/100 \text{ (équation 1)} \times MO) - 180.35 \quad (R^2 \text{ } 0.69)$$

$$dMO = MOD_{\text{corrigée}}/MO$$

- Soit en corrigeant la MOD calculée avec la dMO estimée par l'équation 2

$$MOD_{\text{corrigée}} = 1.2653 \times (dMO/100 \text{ (équation 2)} \times MO) - 156.12 \quad (R^2 \text{ } 0.69)$$

$$dMO = MOD_{\text{corrigée}}/MO$$

- Soit par une nouvelle équation (ALP12, R^2 0.77) basée sur nos déterminations *in vivo*, qui implique l'analyse des constituants pariétaux selon Van Soest (ADF, NDF) et de la cellulose brute (CB), les teneurs des nutriments sont exprimés en g/kg MS.

$$MOD_{ALP12} = -1016.7 + (MO \times 1.8) + [(MA \times ENA)/1000 \times 1.106] + [(MA_{MO} \times HEM_{MO})/1000 \times -3.01] + [(CB_{MO} \times NDF_{MO})/1000 \times -0.0013] + 10.3$$

$$dMO = MOD_{ALP12}/MO$$

$$HEM = NDF - ADF; \quad ENA = MO - MA - CB - MG \text{ (en absence d'analyse de la matière grasse } MG = 35 \text{ g/kg MS)}$$

Equation de prédiction pour le maïs non plante entière (plante partielle ou enrichie)

$$MOD_{ALP12} = -1016.7 + (MO \times 1.8) + [(MA \times ENA)/1000 \times 1.106] + [(MA_{MO} \times HEM_{MO})/1000 \times -3.01] + [(CB_{MO} \times NDF_{MO})/1000 \times -0.0013] - 10.3$$

$$dMO = MOD_{ALP12}/MO$$

$$HEM = NDF - ADF; \quad ENA = MO - MA - CB - MG \text{ (en absence d'analyse de la matière grasse } MG = 35 \text{ g/kg MS)}$$

15.1.2 Calcul de la valeur énergétique des fourrages

Pour calculer la valeur énergétique, les abréviations suivantes sont utilisées :

EB	=	énergie brute, MJ/kg
EM	=	énergie métabolisable, MJ/kg
q	=	métabolisabilité de l'énergie brute
NEL	=	énergie nette pour la production laitière, MJ/kg
NEV	=	énergie nette pour la production de viande, MJ/kg
k_L	=	rendement de l'utilisation de l'EM pour la production laitière
k_V	=	rendement de l'utilisation de l'EM pour la production de viande
k_{En}	=	rendement de l'utilisation de l'EM pour l'entretien
MO	=	matière organique, g/kg
MOD	=	matière organique digestible, g/kg
MA	=	matière azotée, g/kg
MA_{MO}	=	matière azotée, g/kg MO
MAD	=	matière azotée digestible, g/kg

Energie brute

Fourrages (maïs excepté) :	EB = 0.0188 MO + 0.0078 MA
Maïs plante entière :	EB = 0.0196 MO

Energie métabolisable

Fourrages (maïs excepté) :

EM = 0.0142 MOD + 0.0059 MAD,	lorsque MOD/MAD < 7
EM = 0.0151 MOD,	lorsque MOD/MAD ≥ 7

Maïs plante entière :

$$\mathbf{EM} = 0.0155 \text{ MOD}$$

MAD pour les fourrages verts et les fourrages ensilés: **MAD** = MA (0.33 + 0.0033 MA_{MO} – 0.0000061 MA^2_{MO})

MAD pour les fourrages secs et déshydratés artificiellement: **MAD** = MA (0.29 + 0.0033 MA_{MO} – 0.0000064 MA^2_{MO})

Energie nette

NEL	=	$k_L \times EM \times 0.9752$
NEV	=	$k_{EnV} \times EM$

k_L	=	$0.463 + 0.24 q$
q	=	EM / EB
k_{En}	=	$0.554 + 0.287 q$
k_V	=	$0.006 + 0.78 q$
k_{EnV}	=	$(1.5 \times k_{En} \times k_V) / ([0.5 \times k_{En}] + k_V)$

15.1.3 Calcul de la valeur azotée des fourrages

Pour calculer la valeur azotée, les abréviations suivantes sont utilisées :

PAIE	=	protéines absorbables dans l'intestin synthétisées à partir de l'énergie disponible, g/kg
PAIN	=	protéines absorbables dans l'intestin synthétisées à partir de la matière azotée dégradée, g/kg
MO	=	matière organique, g/kg
dMO	=	digestibilité de la MO, %
MOF	=	matière organique fermentescible, g/kg
MA	=	matière azotée, g/kg
MA _{MO}	=	matière azotée dans la MO, g/kg de MO
deMA	=	dégradabilité de la matière azotée, %
MG	=	matière grasse, g/kg
PF	=	produits de fermentation des ensilages, g/kg
dAAA	=	digestibilité des acides aminés d'origine alimentaire, %
AM	=	amidon, g/kg
deAMI	=	dégradabilité de l'amidon, %

Le champ d'application des équations de prédiction de la deMA et de la dAAA est limité aux fourrages semblables à ceux des tables provenant des prairies de composition botanique standard.

Protéines absorbables dans l'intestin

$$\text{PAIE} = 0.093 \times \text{MOF} + \text{MA} \times (1.11 \times (1 - \text{deMA}/100)) \times \text{dAAA}/100$$

$$\text{PAIN} = \text{MA} \times (\text{deMA}/100 - 0.10) \times 0.64 + \text{MA} \times (1.11 \times [1 - \text{deMA}/100]) \times \text{dAAA}/100$$

MOF, matière organique fermentescible

$$\text{MOF} = \text{MO} \times \text{dMO}/100 - \text{MA} \times (1 - \text{deMA}/100) - \text{MG} - \text{PF} - (\text{AM} \times (1 - \text{deAMI}/100)) \text{ } ^a)$$

^{a)} à ne prendre en considération que pour les fourrages riches en amidon (voir tab. 15.4 deAMI du maïs PE ci-dessous)

deMA, dégradabilité de la matière azotée

Herbe :		$\text{deMA} = 51.2 + 0.126 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.00014 \text{ MA}_{\text{MO}}^2$
Ensilage d'herbe :	MS < 50%	$\text{deMA} = 59.5 + 0.153 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.00020 \text{ MA}_{\text{MO}}^2$
	MS > 50%	$\text{deMA} = 54.5 + 0.153 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.00020 \text{ MA}_{\text{MO}}^2$
Foin et regain :		$\text{deMA} = 48.9 + 0.144 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.00020 \text{ MA}_{\text{MO}}^2$
Herbe déshydratée :		$\text{deMA} = 51.9 + 0.092 \text{ MA}_{\text{MO}} - 0.00015 \text{ MA}_{\text{MO}}^2$
Maïs plante entière		La deMA ne peut pas être estimée sur la base de la teneur en MA. Sa valeur a été actualisée sur la base des publications de De Boever et al. (2002 ; tab. 15.3).
Autres fourrages mentionnés		utiliser la deMA standard correspondante des tables.

Tableau 15.3. Dégradabilité moyenne de la matière azotée (deMA) du maïs plante entière

Etat	Stade	deMA
vert	floraison	70
	laiteux	70
	pâteux-mou	65
	pâteux-dur	65
ensilé	laiteux	72
	pâteux-mou	72
	pâteux-dur	72
déshydraté	pâteux-mou	60
	pâteux-dur	60

MG, en absence d'analyses pour les fourrages 35 g/kg MS

PF, produits de fermentation des ensilages, dans le calcul de la matière organique fermentescible (MOF),
que la moitié des produits de fermentation est soustraite : $PF = (PF_{\text{estimés ou analysés}} \times 0.5)$

Si la valeur des PF n'est pas connue :

Ensilage d'herbe ayant une teneur en MS de 35% : $PF_{\text{estimés}} = 100 \text{ g/kg MS}$

Ensilage de maïs ayant une teneur en MS de 30% : $PF_{\text{estimés}} = 75 \text{ g/kg MS}$

Si les teneurs en MS diffèrent, les PF peuvent être estimées comme suit (exception : MS > 60% ; PF=0)

Ensilage de fourrages (excepté maïs) : $PF_{\text{estimés}} = 205 - (3.0 \times \text{teneur en MS, \%})$

Ensilage de maïs plante entière : $PF_{\text{estimés}} = 150 - (2.5 \times \text{teneur en MS, \%})$

dAAA, digestibilité des acides aminés d'origine alimentaire

Herbe : $dAAA = 65.0 + 0.132 MA_{MO} - 0.00014 MA_{MO}^2$

Ensilage d'herbe : MS < 50% $dAAA = 62.8 + 0.138 MA_{MO} - 0.00016 MA_{MO}^2$

MS > 50% $dAAA = 60.5 + 0.127 MA_{MO} - 0.00018 MA_{MO}^2$

Foin et regain : $dAAA = 58.5 + 0.127 MA_{MO} - 0.00018 MA_{MO}^2$

Herbe déshydratée : $dAAA = 56.4 + 0.141 MA_{MO} - 0.00023 MA_{MO}^2$

Maïs plante entière : Une dAAA moyenne de 72 % a été retenue (De Boever et al. 2002).

Pour les autres fourrages, utiliser par défaut une dAAA de 70 %

Exception pour les ensilages de cultures dérobées prendre 60 %

Dégradabilité de l'amidon (deAMI)

Les données sur la dégradabilité de l'amidon (Philippeau et Michalet-Doreau, 1997) permettent de prendre en compte cette fraction pour corriger la teneur en matière organique fermentescible (tableau 15.4).

Tableau 15.4. Dégradabilité moyenne de l'amidon (deAMI) du maïs plante entière

Etat	Stade	Teneur moyenne en amidon g/kg MS	deAMI %
vert	pâteux-dur	315	60
ensilé			70
déshydraté			50

15.2 Equations de base pour les aliments simples (fourrages exceptés)

15.2.1 Calcul de la valeur énergétique des aliments simples

N'est pas valable pour les aliments simples comme la graisse ou la dextrose

Energie brute

$$EB = 0.0242 MA + 0.0366 MG + 0.0209 CB + 0.0170 ENA - 0.00063 MDS^a)$$

Energie métabolisable

$$EM = 0.0159 MAD + 0.0377 MGD + 0.0138 CBD + 0.0147 ENAD - 0.00063 MDS^a)$$

^{a)} A ne prendre en considération que pour les produits laitiers, lorsque $MDS \geq 80$ g/kg de MS.

MAD	=	matière azotée digestible
MGD	=	matière grasse digestible
CBD	=	cellulose brute digestible
ENAD	=	extractif non azoté digestible
MDS	=	mono- et disaccharides (lactose)

Energie nette

q	=	EM / EB	
k_L	=	$0.463 + 0.24 q$	$\rightarrow NEL = 0.9752 \times k_L \times EM$
k_{En}	=	$0.554 + 0.287 q$	
k_V	=	$0.006 + 0.78 q$	
k_{EnV}	=	$(1.5 \times k_{En} \times k_V) / ([0.5 \times k_{En}] + k_V)$	$\rightarrow NEV = k_{EnV} \times EM$

Les teneurs en nutriments sont exprimées en g/kg MF ou MS.

Les valeurs énergétiques sont exprimées en MJ/kg MF ou MS.

15.2.2 Calcul de la valeur azotée des aliments simples

Les teneurs en protéines absorbables dans l'intestin PAIE et PAIN sont calculées de la manière suivante:

$$PAIE = 0.093 \times MOF + MA \times (1.11 \times (1 - deMA/100)) \times dAAA/100$$

$$PAIN = MA \times (deMA/100 - 0.10) \times 0.64 + MA \times (1.11 \times [1 - deMA/100]) \times dAAA/100$$

$$MOF = MO \times dMO/100 - MA \times (1 - deMA/100) - MG^a) - AM^b) \times (1 - deAMI/100) - (PF^c) \times 0.5$$

Les teneurs en MOF, MA, MG, AMI, PF et en PAI sont données en g/kg de MS.

Les valeurs deMA, deAM, deAMI et dAAA sont exprimées en %.

- ^{a)} MG valeur analysée, sinon voir les valeurs données dans [Feedbase.ch](https://www.feedbase.ch)
- ^{b)} AM n'est à prendre en considération que pour les aliments riches en amidon, lorsque la dégradabilité est $\leq 85\%$
- ^{c)} PF Les produits de fermentation des ensilages sont constitués par l'acide lactique, les acides gras volatils (acide acétique, acide propionique et acide butyrique) et les alcools.

Si les PF ne sont pas connus, on prendra les valeurs suivantes:

PF = 95 g/kg de MS pour la pulpe de betteraves ensilée

PF = 50 g/kg de MS pour les ensilages de maïs grain, d'épis de maïs et de drêches de brasserie.

15.3 Equation de prédiction pour les aliments composés

15.3.1 Calcul de la valeur énergétique des aliments composés

$$\mathbf{NEL_{MO}} = - 13.67 + 0.0226 \mathbf{MA_{MO}} + 0.0358 \mathbf{MG_{MO}} + 0.0074 \mathbf{CB_{MO}} + 0.0222 \mathbf{ENA_{MO}}$$

Niveau de précision : $s=0.3$; $R^2= 0.88$

$$\mathbf{NEV_{MO}} = - 279.43 + 0.2888 \mathbf{MA_{MO}} + 0.3058 \mathbf{MG_{MO}} + 0.2689 \mathbf{CB_{MO}} + 0.2891 \mathbf{ENA_{MO}}$$

Niveau de précision : $s=0.4$; $R^2= 0.88$

Les teneurs en MA, MG, CB et ENA sont données en g/kg de MO, les valeurs NEL et NEV en MJ/kg de MO.

Domaine de validité des régressions : cellulose brute maximum 180 g/kg de MO
matière grasse maximum 100 g/kg de MO

15.3.2 Calcul de la valeur azotée des aliments composés

Pour les aliments composés ayant une teneur en matière azotée variant entre 100 et 180 g/kg d'aliment ou entre 110 et 200 g/kg de MS:

$$\mathbf{PAIE_{MO}} = 151 + 0.00229 \mathbf{MA^2_{MO}} - 0.00656 \mathbf{deMA^2} + 0.2766 \mathbf{MG_{MO}} - 0.00066 \mathbf{MG^2_{MO}} - 0.5054 \mathbf{ENA_{MO}} + 0.00054 \mathbf{ENA^2_{MO}}$$

Niveau de précision: $s= 4$; $R^2= 0.97$

Pour les aliments composés ayant une teneur en matière azotée supérieure à 180 et inférieure à 450 g/kg d'aliment respectivement supérieure à 200 et inférieure à 500 g/kg de MS:

$$\mathbf{PAIE_{MO}} = 560 + 0.00033 \mathbf{MA^2_{MO}} - 5.8230 \mathbf{deMA} - 0.00384 \mathbf{MG^2_{MO}} - 0.4886 \mathbf{CB_{MO}}$$

Niveau de précision: $s=13$; $R^2= 0.94$

Les teneurs en MA, MG, CB, ENA et PAI sont données en g/kg de **MO**, la valeur deMA est exprimée en %.

15.4 Facteurs de conversion et concordances

Les systèmes français, hollandais et suisses d'évaluation des aliments ont des structures communes, mais chaque système a des équations de prédiction qui lui sont spécifiques. La méthode la plus précise pour convertir d'un système à un autre les valeurs énergétiques et azotées des aliments est de disposer de leurs valeurs de base et de les utiliser dans les structures de chaque système. Lorsque ces informations manquent, le passage d'un système d'évaluation énergétique à un autre est possible avec l'aide de facteurs de conversion (tab.15.5). Les résultats obtenus n'ont qu'une valeur indicative, peu précise, parce que les facteurs de conversion varient avec les aliments.

Tableau 15.5. Facteurs de conversion moyens pour passer d'un système d'évaluation énergétique à un autre

Systèmes	Facteurs
suisse → français	UFL = NEL / 6.7* UFV = NEV / 7.3*
suisse → hollandais	VEM = NEL / 0.0069 VEVI = NEV / 0.0069
français → suisse	NEL = UFL x 6.7 NEV = UFV x 7.3
hollandais → suisse	NEL = VEM x 0.0069 NEV = VEVI x 0.0069

* Les facteurs de conversion 6.7 et 7.3 ne sont valables que pour l'herbe et ses conserves. Pour le maïs plante entière, ces facteurs sont respectivement 6.8 et 7.5.

Avec les aliments concentrés, la variation de ces facteurs est telle que leur emploi n'est pas conseillé.

Afin de faciliter la compréhension des systèmes d'évaluation azotée, des éléments de concordances sont donnés dans le tableau 15.6.

Tableau 15.6. Concordances entre les systèmes d'évaluation azotée

Systèmes	Facteurs
suisse ⇔ français	PAIE ⇔ PDIE PAIN ⇔ PDIN PAIA ⇔ PDIA PAIM ⇔ PDIME PAIMN ⇔ PDIMN
suisse ⇔ hollandais	PAIE ⇔ DVE PAIA ⇔ DVBE PAIM ⇔ DVME PME ⇔ MREE PMN ⇔ MREN

15.5 Bibliographie

Andrieu J. et Baumont R., 2000. Digestibilité et ingestibilité du maïs fourrage : facteurs de variation et prévision. Fourrage, 163, 239-252.

Barrière Y. & Emile J.-C., 2000. Le maïs fourrage: Evaluation et perspectives de progrès génétiques sur les caractères de valeur alimentaire. Fourrage 163, 221–238.

♥ Daccord R., Arrigo Y, Vogel R., 1996. Valeur nutritive de l'ensilage de maïs. Revue suisse Agric. 28 (1), 17-21.

De Boever J.L, Vanacker J.M., De Brabander D.L., 2002. Rumen degradation characteristics of nutriments in maize silages and evaluation of laboratory measurements and NIRS as predictors. Animal Feed Science and Technology, 101, 73-86.

♥ Herter U., Arnold A., Schubiger F., Menzi M., 1996. Verdaulichkeit, das wichtigste Qualitätsmerkmal bei Silomais. Agrarforschung, 535-538.

Philippeau C., Michalet-Doreau B., 1997. Influence of genotype and stage of maturity of maize on rate of ruminal starch degradation. Animal Feed Science and Technology, 68, 25-35

Version: octobre 2017

Éditeur: Agroscope

Rédaction: R. Daccord, Y. Arrigo, C. Chaubert

Copyright: Agroscope

svp reproduire le contenu avec référence