



4/ Propriétés et utilisation des engrais

Walter Richner ¹, René Flisch ¹, Jochen Mayer ¹, Patrick Schlegel ², Michael Zähler ³ et Harald Menzi ²

¹ Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

² Agroscope, 1725 Posieux, Suisse

³ Agroscope, 8356 Ettenhausen, Suisse

Renseignements: walter.richner@agroscope.admin.ch

Table des matières

1. Introduction	4/3
2. Les engrais de ferme	4/3
2.1 Introduction	4/3
2.2 Production d'engrais de ferme et teneurs en éléments nutritifs	4/3
2.3 Disponibilité de l'azote dans les engrais de ferme	4/8
2.4 Traitement des engrais de ferme	4/9
2.5 Utilisation des engrais de ferme	4/12
3. Engrais de recyclage et produits de méthanisation	4/12
3.1 Introduction	4/12
3.2 Teneur en éléments nutritifs dans les engrais de recyclage et les produits de méthanisation	4/13
3.3 Indications générales pour l'utilisation des composts et des produits de méthanisation issus d'installations artisanales et industrielles	4/13
4. Engrais minéraux	4/14
4.1 Introduction	4/14
4.2 Principales propriétés des engrais minéraux	4/14
4.3 Effet des engrais minéraux sur le sol	4/18
5. Bibliographie	4/18
6. Liste des tableaux	4/20
7. Liste des figures	4/20
8. Liste des annexes	4/20
9. Annexes	4/21

1. Introduction

Selon le concept de fertilisation en agriculture (PRIF; Sinaj et Richner 2017) (figure 2, module 1), les besoins des cultures en éléments nutritifs sont couverts par les éléments prélevés des réserves du sol, par ceux qui proviennent de la décomposition des résidus de récolte, ainsi que, subsidiairement, par les engrais. Une utilisation optimale des éléments nutritifs par les plantes ne peut être atteinte que moyennant une bonne connaissance de leurs possibilités d'utilisation et en tenant compte des techniques culturales, ainsi que des aspects environnementaux. Il s'agit, en priorité, de bien connaître les quantités d'engrais de ferme disponibles ainsi que leurs teneurs en éléments nutritifs, de même pour les engrais de recyclage et les engrais minéraux. Des indications sur les propriétés fertilisantes de ceux-ci sont nécessaires, comme par exemple la rapidité d'action, les teneurs en éléments indésirables, ainsi que les effets spécifiques sur le sol. Ce module est dévolu à ces informations.

2. Les engrais de ferme

2.1 Introduction

Dans de nombreuses exploitations, les éléments nutritifs contenus dans les engrais de ferme (lisier/purin et fumier) couvrent une bonne partie des besoins des cultures. Il est donc essentiel, dans les exploitations avec bétail, de bien gérer les engrais de ferme, tant du point de vue de la nutrition des plantes que du point de vue économique et écologique (module 7). La valorisation ciblée des engrais de ferme n'est pas sans difficultés: les quantités d'engrais sont généralement importantes, leurs teneurs en éléments nutritifs sont relativement faibles et difficiles à quantifier, les pertes d'éléments nutritifs peuvent être importantes selon les conditions, principalement sous forme d'ammoniac (NH_3). De plus, la disponibilité des différentes fractions de l'azote (N) contenu dans les engrais de ferme est difficilement prévisible, notamment celle de N lié à la matière organique. Les valeurs indicatives constituent généralement le seul moyen d'évaluer les quantités d'engrais de ferme produites et leurs teneurs; à ceci s'ajoutent les plus ou moins grandes différences d'une exploitation à l'autre. En prenant en compte la variabilité des flux d'éléments nutritifs et en appliquant les recommandations générales concernant l'utilisation des engrais de ferme, les valeurs indicatives constituent néanmoins un bon instrument pour une valorisation optimale des engrais de ferme, tant au point de vue agronomique que du point de vue écologique.

2.2 Production d'engrais de ferme et teneurs en éléments nutritifs

2.2.1 Données de base et méthodes de calcul

Dans les excréments des animaux de ferme, on retrouve une bonne partie des éléments nutritifs contenus dans les fourrages qu'ils ont ingérés (figure 1). Selon les éléments nutritifs produits, l'espèce animale, le mode d'affouragement,

le niveau de production et l'état de santé des animaux, la proportion des éléments excrétés par rapport à ceux qui ont été ingérés peut varier entre 50 % et 100 % dans une exploitation agricole. En utilisant les excréments des animaux comme engrais, le cycle des éléments nutritifs au sein de l'exploitation est néanmoins en bonne partie fermé.

Toutes les données concernant les quantités d'éléments nutritifs excrétés par les animaux de rente et les teneurs y relatives dans les engrais de ferme sont basées sur des calculs de bilans, à savoir: ingestion par les fourrages moins la rétention dans le corps de l'animal, le lait ou les œufs. Ces calculs sont établis sur la base de plans d'affouragement avec différentes rations ainsi que sur des relevés dans différentes exploitations. Ils prennent ainsi en compte l'état actuel des techniques de production dans la pratique. Les besoins en éléments nutritifs des animaux de rente sont tirés des Apports alimentaires recommandés (Agroscope 2015, 2016). Les teneurs et les valeurs nutritives du fourrage sont issues des références Agroscope (2017). Les teneurs en éléments nutritifs des corps d'animaux, du lait et des œufs sont présentées dans le tableau 1.



Figure 1. Une valorisation des éléments nutritifs contenus dans les excréments des animaux qui soit à la fois conforme aux besoins des plantes et ménage l'environnement est un défi pour les exploitations avec bétail (photo: Harald Menzi, Agroscope).

En considérant les pertes de N à l'étable, en cours de stockage, lors de l'épandage et sachant que le N lié à la matière organique n'est pas disponible en totalité, les quantités de N contenu dans les engrais de ferme épandus ne peuvent pas être entièrement prises en compte comme éléments nutritifs. C'est pourquoi, on différencie le N total (N_{tot} ; mesurable analytiquement; voir la définition dans l'annexe 1), le N soluble (N_{sol} ; mesurable analytiquement; voir la définition dans l'annexe 1) et le N disponible pour les plantes en bonnes conditions de production (N_{disp} ; déterminé sur la base de résultats issus de nombreuses années d'essais; mesurable analytiquement; voir la définition dans l'annexe 1). En général, on admet que 60 % du N_{tot} contenu dans les engrais de ferme, toutes espèces d'animaux de rente confondues, est dispo-

nible pour les plantes à moyen terme. En tenant compte des pertes inévitables à l'étable et pendant le stockage, la disponibilité effective de la quantité de N excrétée par les animaux se situe autour de 50 %.

2.2.2 Les déjections des animaux de rente

Le tableau 2 présente les quantités d'éléments nutritifs contenues dans les déjections des animaux de rente par place d'animal et par année en conditions de production moyennes. Toutes ces données se rapportent aux déjections animales, litière non comprise, pour une intensité de production moyenne et un affouragement conforme aux recommandations d'Agroscope (Agroscope 2015, 2016). Pour des calculs spécifiques à certains types d'exploitations, d'éventuelles différences par rapport aux valeurs de référence peuvent être corrigées d'après les indications présentées dans le tableau 3. Les données utilisées pour les calculs sont documentées dans l'annexe 2.

Tableau 1. Teneurs en éléments nutritifs des corps d'animaux, du lait et des œufs. Ces valeurs sont prises en compte dans les calculs de bilans pour déterminer les quantités d'éléments nutritifs dans les déjections.

Type d'animal/produit	Teneur en éléments nutritifs (g/kg de poids vif, g/l de lait, g/kg d'œufs)						
	N	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O	Mg	Ca
Vache laitière	25	6,0	14	1,6	1,9	0,50	11,6
Veau	24	5,9	14	1,6	1,9	0,35	11,0
Taureau à l'engrais	28	7,0	16	2,1	2,5	0,40	13,0
Mouton	22	6,0	14	1,2	1,4	0,30	11,0
Chèvre	21	5,3	12	1,5	1,8	0,35	9,0
Porcelet	25	5,3	12	2,3	2,9	0,34	8,3
Porc, accroissement (25–120 kg)	26	5,4	12	2,3	2,8	0,30	8,0
Porc à l'engrais, truie ¹	25	5,1	12	2,2	2,7	0,30	8,0
Volaille	29	5,8	13	2,6	3,1	0,30	10,0
Lait	5,5	1,0	2,3	1,6	1,9	0,10	1,2
Oeufs	18	1,8	4,2	1,2	1,4	0,50	33,0

¹ La truie n'est en général pas prise en compte dans les bilans.

Tableau 2. Valeurs indicatives des quantités d'éléments nutritifs dans les fèces et l'urine de différents animaux de rente.

Des données pour d'autres animaux de rente sont consignées dans l'annexe 3.

Type d'animal/type de production		Éléments nutritifs excrétés annuellement en kg par unité (animal ou place animal)							Consommation de fourrage de base (dt matière sèche/an)
		N	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O	Mg	Ca	
Vache laitière	Production annuelle: 7'500 kg ¹	112	17	39	143	172	14	36	56
Vache allaitante ²	Races lourdes (> 700 kg)	95	14	31	131	158	10	30	50
	Races moyennes (600–700 kg)	85	12	28	117	141	9,0	27	45
	Races légères (< 600 kg)	72	10	24	98	118	8,0	23	38
	Génisse d'élevage ^{A1}	Moins de 1 an	25	3,3	7,5	29	35	4,0	10
Veau à l'engrais ^{A2}	1 à 2 ans	40	5,7	13	50	60	5,0	15	22
	Plus de 2 ans	55	8,7	20	62	75	7,0	23	33
	Par place	18	3,1	7,1	9,4	11	1,1	7,0	1,0
Veau de vache allaitante ^{A3}	Par animal engraisé	5,5	0,9	2,1	2,8	3,4	0,3	2,1	0,3
	Jusqu'à env. 350 kg/animal engraisé	22	3,1	7,0	20	24	1,3	3,8	6,0
	Jusqu'à env. 220 kg/animal engraisé	9,0	1,4	3,2	5,5	6,6	0,6	1,5	1,0
Bovin à l'engrais (65–530 kg) ^{A4}	Age max. 160 j., par place	23	2,2	5,0	19	23	1,3	2,9	6
	Age > 160 jours, par place	49	5,7	13	34	42	4,2	15	21
Bovin engraisé au pâturage (65–530 kg) ^{A5}		40	5,2	12	46	55	4,0	13	16
Taureau d'élevage		50	7,9	18	70	85	5,0	20	30
Jument avec poulain ^{A6}		52	13	31	73	88	7	23	29
Autre cheval ^{A7}	De plus de 3 ans	44	10	23	62	75	5	19	29
	Poulain	42	8	18	56	67	4	14	26
Place de chèvre ³		17	2,5	5,7	20	24	1,5	6,5	7,5
Place de mouton ^{3, A8}		18	2,6	6,0	21	25	2,0	7,0	8
Place de mouton laitier ³		20	3,7	8,5	24	29	2,1	7,4	9
Porc à l'engrais/remonte ^{4, A9}	Par place	13	2,3	5,3	4,8	5,8	1,4	3,3	0
	Par animal produit	3,9	0,7	1,6	1,5	1,8	0,40	1,0	0
Truie d'élevage ^{5, A10}	Par place	44	9,2	21	19	23	4,2	11	0
	Verrat	18	4,4	10	8,0	9,6	1,5	6,0	0
Truie allaitante ^{A10}	Par place	49	10	23	15	18	4,4	12	0
	Par truie et rotation	5,0	1,0	2,3	1,5	1,8	0,40	1,2	0
Truie gestante ^{5, A10}	Par place	25	6,5	15	14	16	2,3	8,5	0
	Par truie et rotation	8,3	2,2	5,1	4,6	5,5	0,80	2,9	0
Porcelet sevré ^{5, A10}	Par place	3,9	0,73	1,7	1,9	2,3	0,50	0,70	0
	Par porcelet élevé	0,41	0,08	0,17	0,20	0,24	0,05	0,08	0

Tableau 2 (suite)

Type d'animal/type de production		Éléments nutritifs excrétés annuellement en kg par unité (animal ou place animal)						Consommation de fourrage de base (dt matière sèche / an)	
		N	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O	Mg		Ca
Poule pondeuse ^{6, A11} Poulette ^{A12}	Par 100 places	80	20	46	25	30	6,5	100	0
	Par 100 places	30	7,4	17	10	12	2,5	11	0
Poulet à l'engrais ^{7, A13} Dinde à l'engrais ⁸	Par 100 animaux élevés	13	3,3	7,5	4,5	5,4	1,1	5	0
	Par 100 places	36	6,0	13	18	22	4,4	4	0
	Par 100 places	140	31	70	33	40	18	35	0
	Par 100 animaux engraisés	48	11	25	11	13	6,5	12	0

Notes ¹⁻⁸ voir tableau 3; notes ^{A1-A13} voir annexe 2.

Tableau 3. Notes se rapportant au tableau 2 avec les données pour une attribution correcte des catégories ou pour des corrections spécifiques à des exploitations qui sont importantes pour le calcul des flux d'éléments nutritifs. D'autres notes sur les bases des calculs d'éléments nutritifs dans les déjections figurent dans l'annexe 2.

Note du tableau 2	Type d'animal/type de production	Description du type de production
1	Vache laitière	Production laitière annuelle moyenne: 7'500 kg; poids vif adulte moyen: 660 kg. Pour les calculs: par 1'000 kg de production en moins, les déjections diminuent (-5 % de N, -7 % de P [P ₂ O ₅], -3 % de K [K ₂ O], -7 % de Mg et -6 % de Ca) tandis que la consommation de fourrage de base baisse de 1,5 %; par 1'000 kg de production en plus, les déjections augmentent d'autant, de même que la consommation de fourrage de base. Cette correction prend aussi les différences de poids vif en compte.
2	Vache allaitante	Vache allaitante avec 1 veau; les valeurs admises pour les déjections se rapportent à la vache sans veau. Pour les vaches avec plus d'un veau, on peut prendre les valeurs de la catégorie de poids supérieure. Races lourdes: poids vif moyen de 720 à 800 kg au stade adulte (p. ex. Limousin, Blonde d'Aquitaine, Charolais) Races moyennes: 600 à 700 kg (p. ex. Brune suisse, Simmental, Angus, croisement F1) Races légères: 500 à 550 kg (p. ex. Galloway, vache grise rhétique, Hérens).
3	Place mouton ou chèvre	Mères, y compris la remonte des animaux d'élevage, jeunes animaux en finition d'engraissement et part pour le bélier ou le bouc.
4	Place porc à l'engrais	La quantité de P dans les déjections est basée sur une teneur de 5,2 g de P par kg d'aliment (14 MJ ¹ EDP ² par kg d'aliment; aliment standard sans réduction de la teneur en N et en P [NPr] ou alimentation par phases). A une différence de 1 g P/kg correspond un supplément ou une réduction d'environ 30 %. La quantité de N dans les déjections est calculée pour une teneur en matière azotée (MA) de 170 g par kg d'aliment (14 MJ EDP par kg d'aliment). Un écart de 10 g MA/kg par rapport à la valeur standard entraîne un supplément ou une réduction de 9 % dans les déjections. Des données plus détaillées pour faire les calculs des déjections en cas d'utilisation d'aliments aux teneurs en N et en P réduites sont contenues dans les modules complémentaires 6 et 7 du Suisse-Bilanz (Agridea et OFAG 2016).
5	Truie d'élevage	Par place de porc d'élevage et par an, la quantité de N et de P dans les déjections est calculée pour une teneur moyenne en matière azotée (MA) de 173 g/kg et une teneur en P de 5,8 g/kg (aliment combiné pour truies à raison de 61 % et 39 % d'aliment pour porcelets). A 10 g de réduction de la teneur en MA correspond une diminution de 8 % des quantités de N dans les déjections et, par gramme de réduction des teneurs en P, s'ensuit une diminution de 24 % de P. Pour une production séparée (à savoir aliments différents pour truies allaitantes et truies portantes), on a pris comme base une teneur en MA de 145 g/kg d'aliment pour truies portantes, de 180 g/kg d'aliment pour truies allaitantes et de 177 g/kg d'aliment pour porcelets. On a admis 6 g P/kg pour les truies (portantes ou allaitantes) et pour les porcelets 5,7 g P/kg. A 10 g de réduction de la teneur en MA correspond une réduction de la quantité de N dans les déjections de 6 % pour les truies portantes, de 8 % pour les truies allaitantes et de 12 % pour les porcelets. Pour chaque g de teneur en P en moins, la réduction des quantités de P dans les déjections est de 18 % pour les truies portantes, de 23 % pour les truies allaitantes et de 40 % pour les porcelets. Des données plus détaillées pour faire les calculs des déjections en cas d'utilisation d'aliments aux teneurs en N et en P réduites sont contenues dans les modules complémentaires 6 et 7 du Suisse-Bilanz (Agridea et OFAG 2016).
6	Poule pondeuse	La quantité de P dans les déjections est basée sur une teneur de 5,7 g P/kg d'aliment. A une différence de 1 g P/kg correspond un supplément ou une réduction d'environ 20 %.
7	Poulet à l'engrais	Pour le calcul des déjections, on peut s'appuyer sur le module complémentaire 7 du Suisse-Bilanz «Bilan import/export» de l'Office fédéral de l'agriculture OFAG et d'Agridea en tenant compte des entrées et sorties d'animaux. Ce calcul est obligatoire pour les exploitations dont l'effectif moyen dépasse 3'000 bêtes.
8	Dinde à l'engrais	Les calculs se basent sur un poids moyen en fin d'engraissement de 12 kg et sur 2,8 rotations par année. Dans le cas de places de dindes en pré-engraissement (jusqu'à environ 1,5 kg de poids vif et 6 rotations par année), on peut calculer, pour 100 places par année, 40 kg N, 9 kg P et 10 kg K dans les déjections. Pour la deuxième phase d'engraissement (de 1,5 à 13 kg de poids vif et 2,9 rotations par année), les quantités correspondantes pour 100 places sont de 230 kg N, 50 kg P et 58 kg K.

¹ Mégajoule.² Energie digestible pour le porc.

Pour les bovins et les petits ruminants, les références proviennent de la Banque de données sur le trafic des animaux (BDTA) sans prise en compte de la durée de vide sanitaire. Pour les porcs et la volaille, le vide sanitaire entre les rotations a été pris en compte dans les données par place d'animal et par an (annexe 2).

Pour certaines catégories d'animaux, avec des rotations clairement délimitées (donc sans production couvrant l'année entière), on peut aussi se référer aux données par animal produit.

Des données concernant la consommation de fourrage de base et les déjections d'autres catégories d'animaux se trouvent dans l'annexe 3.

2.2.3 Production d'engrais de ferme

L'affouragement détermine la quantité de déjections animales et, par conséquent, les quantités de fumier et de lisier/purin produites. Les valeurs indicatives sur les quantités de fumier et de lisier/purin produites selon les animaux de rente et pour différents systèmes de stabulation figurent dans le tableau 4. Elles servent en premier lieu au dimensionnement des volumes de stockage nécessaires pour les engrais de ferme et, subsidiairement, à une esquisse de planification de la fertilisation.

Selon le système de stabulation, il n'est produit que du lisier/purin, du fumier et du lisier/purin ou uniquement du fumier. Pour la stabulation entravée ou la stabulation

Tableau 4. Quantités indicatives d'engrais de ferme produits annuellement par différentes espèces d'animaux de rente dans différents systèmes de stabulation.

	Type d'animal/type de production	Production d'engrais de ferme et utilisation de paille par année ¹ selon le système de stabulation ²					
		Lisier seul ³ (m ³)	Purin/fumier ^{3, 4}			Fumier seul ⁴	
			Paille utilisée (dt/an)	Purin (m ³)	Fumier (t)	Paille utilisée (dt/an)	Fumier (t)
1	Vache laitière, production 7'500 kg/an ⁵	23	6,8	11	8,9	30	21
1	Vache allaitante, lourde ⁶	19	5,0	9,4	7,6	25	18
1	mi-lourde ⁶	17	5,0	8,7	6,7	25	16
1	légère ⁶	15	5,0	7,0	5,7	25	13
1	Génisse d'élevage, moins de 1 an	4,8	1,5	2,4	2,0	8,0	4,6
1	Génisse d'élevage, 1 à 2 ans	8,0	2,5	4,0	3,2	12	7,6
1	Génisse d'élevage, plus de 2 ans	12	3,5	5,4	4,4	16	10
1	Place de veau à l'engrais					4,2	3,2
1	Veau de vache allaitante, jusqu'à env. 350 kg	4,1	1,3	2,0	1,6	4,2	3,8
1	Veau de vache allaitante, jusqu'à env. 220 kg	1,6	0,6	0,8	0,6	2,4	1,5
1	Place bovin à l'engrais, jusqu'à 160 j	4,5	selon le type de stabulation ⁷			11,0	5,0
1	âge > 160 j	10	selon le type de stabulation ⁷			16	11
1	Cheval (fumier frais)					29	12 ⁸
1	Jument avec poulain, jusqu'à 0,5 an (fumier frais)					36	14 ⁸
1	Poulain, 0,5 à 2,5 ans (fumier frais)					15	10 ⁸
1	Place chèvre					3,7	1,7
1	Place mouton					3,7	1,7
1	Place brebis laitière					3,7	2,3
1	Place porc à l'engrais	1,6	selon le type de stabulation ⁷			2,6	1,2
1	Place truie d'élevage	7,5	selon le type de stabulation ⁷			8,0	4,2
1	Place truie après mise bas	8,2	selon le type de stabulation ⁷			10	3,5
1	Place truie portante	5,5	selon le type de stabulation ⁷			6,0	2,3
1	Place porcelet	0,6	selon le type de stabulation ⁷			1,0	0,3
				Fosse à crottes/ Elevage au sol			
100	Places poules pondeuses	2,7		1,5			
100	Places poulettes	1,0		0,6			
100	Places poulets à l'engrais			0,8			
100	Places dindes à l'engrais			3,0			

libre, on peut s'attendre aux mêmes quantités d'engrais de ferme. Les quantités usuelles de litière et les pertes en cours de stockage sont incluses dans les quantités de fumier indiquées. Les pertes au stockage peuvent varier selon le type de fumier, le mode de stockage et les conditions climatiques. Il en résulte que les quantités de fumier effectives peuvent s'écarter des valeurs indicatives.

Les données présupposent une occupation continue des étables. En cas d'absences temporaires (pâturation), les quantités de fumier et de lisier/purin doivent être réduites proportionnellement au temps passé à la pâturation (figure 2). Exemple: pour 200 jours de pâturation à raison de 8 h/j, le calcul est le suivant:

$$(200 \times 8) / (365 \times 24) \times 100 \rightarrow \text{réduction de } 18,3 \%$$

Les quantités d'engrais de ferme indiquées se rapportent à une intensité de production moyenne (tableau 3 et annexe 2); pour une intensité de production plus élevée, la quantité produite est en conséquence plus élevée.

Les données du tableau 4 se rapportent à du lisier/purin non dilué. Dans la plupart des exploitations, des quantités d'eau non négligeables peuvent s'écouler dans la fosse à lisier/purin: eau de lavage des étables, eau de rinçage de la chambre à lait, eau de pluie de places non couvertes, eau usée du ménage, etc. La quantité effective de lisier/purin non dilué ne peut être déterminée que si l'on connaît les quantités d'eau qui s'écoulent dans la fosse. Des valeurs indicatives figurent dans le tableau 5. Le taux de dilution usuel est de 1:1 (une part de lisier/purin:une part d'eau). Pour éviter des pertes importantes de N lors de l'épandage par temps chaud, il est recommandé d'augmenter la dilution (volatilisation du NH_3 ; tableau 2, module 7).

Notes pour le tableau 4, p. 4/6

¹ En cas d'absence temporaire de l'étable (pâturation, alpage), les quantités d'engrais de ferme doivent être réduites en fonction des jours d'absence. Les quantités se rapportent à un niveau de production moyen. Pour une intensité de production supérieure, les quantités d'engrais de ferme produites sont d'autant plus élevées.

² Selon le système de stabulation, il n'est produit que du lisier/purin, du fumier et du lisier/purin ou uniquement du fumier. Pour les stabulations entravées et les stabulations libres, les calculs sont établis avec les mêmes quantités. Dans les quantités de fumier indiquées, les pertes durant le stockage sont incluses. Ces dernières peuvent varier selon le type de fumier, le mode de stockage et les conditions climatiques. Pour ces raisons, la quantité de fumier peut différer de la valeur indicative.

Pour le fumier en tas et le fumier de stabulation (voir annexe 1), on peut admettre un poids volumique de 700–800 kg/m³. Le fumier chargé sur l'épandeur au chargeur frontal ou à la grue pèse 550–650 kg/m³ sur le véhicule, chargé à la fourche, 700–800 kg/m³. Ces indications ne sont pas valables pour un fumier contenant une forte proportion de restes de fourrages ou d'autres déchets organiques, ni pour du fumier ne contenant que des fèces raclées sans litière (étable d'alpage). Pour s'adapter à des conditions d'exploitation spécifiques, il est conseillé de peser plusieurs épandeurs normalement chargés.

³ A côté du type de bétail, le genre de lisier/purin dépend de la proportion de fèces qu'il contient. Les quantités de lisier/purin se rapportent à un produit non dilué. L'adjonction d'eau usée doit être prise en compte selon les données du tableau 5. Usuellement, on admet une dilution 1:1 (une part de lisier/purin pour une part d'eau).

⁴ Le type et la qualité du fumier dépendent de la quantité de litière et la proportion de fèces et d'urine qu'il contient. Beaucoup de litière et/ou peu de bouse raclée donne un fumier paillu. En termes de poids, l'influence de la quantité de litière influence peu la quantité de fumier produit.

⁵ Le calcul est fondé sur une production annuelle de 7'500 kg de lait. Pour chaque tranche de 1'000 kg de différence en plus ou en moins, les valeurs sont à modifier de +/- 5%. Ces corrections tiennent compte des différences de poids vif.

⁶ Animaux lourds: > 700 kg
Animaux mi-lourds: 600 à 700 kg
Animaux légers: < 600 kg

⁷ Dans ce genre de stabulation, il y a en général du lisier sur une partie de la surface, du fumier sur l'autre. Les proportions peuvent être estimées en fonction des surfaces correspondant à chacun des produits. Ceux-ci sont à considérer au même titre que du lisier et du fumier de stabulation libre. Exemple: stabulation avec 60% de surface en litière et 40% de caillebotis: calculer avec 60% de fumier de stabulation et 40% de lisier.

⁸ Les valeurs indiquées se basent sur du fumier frais de cheval (stocké moins d'un mois). En cas de stockage et de fermentation plus longs (plus de trois mois), les valeurs indicatives peuvent être divisées par deux.

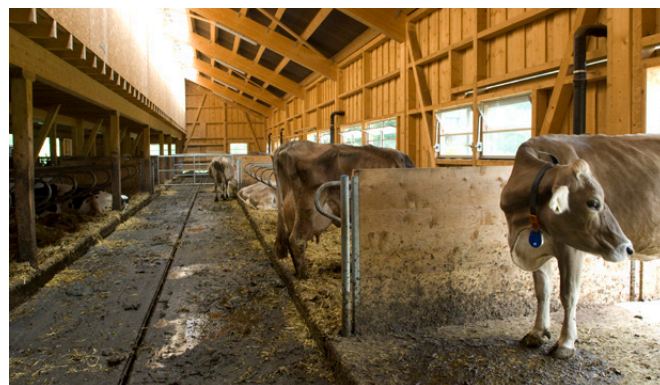


Figure 2. En cas d'absence temporaire de l'étable, les quantités d'engrais de ferme doivent être réduites en fonction des jours d'absence des vaches (photo: Gabriela Brändle, Agroscope).

2.2.4 Teneurs en éléments nutritifs dans les engrais de ferme

Les valeurs indicatives relatives aux teneurs moyennes en éléments nutritifs des différentes sortes de lisier/purin et de fumier sont contenues dans le tableau 6. Pour le lisier/purin, c'est la valeur du produit non dilué qui est indiquée. Pour déterminer les teneurs dans un lisier/purin dilué, il faut tenir compte de la quantité d'eau ajoutée selon les indications contenues dans le tableau 5:

Teneur lisier/purin dilué	=	Teneur lisier/purin non dilué
		(parts de lisier/purin non dilué + parts d'eau)

L'affouragement influence la teneur en éléments nutritifs des engrais de ferme. Toutefois, les valeurs indicatives sont fixées de manière à permettre des corrections uniquement en cas de conditions particulières (annexe 2), par exemple en agriculture bio, lorsque la teneur en potassium (K) du fourrage diffère sensiblement de la valeur de référence ou que la teneur en phosphore (P) des rations pour porcs et

Tableau 5. Valeurs indicatives pour le calcul des quantités d'eaux usées déversées dans la fosse à lisier/purin (OFEV et OFAG 2011).

La quantité d'eau utilisée par unité de gros bétail (UGB) peut varier fortement. Seul un compteur d'eau peut permettre une mesure précise pour l'exploitation.

Provenance des eaux usées	Unité de référence	Quantité en m ³ /mois		Quantité en m ³ /an
		Été	Hiver	
Bovins				
Eau pour le nettoyage de l'étable et des soins aux animaux ¹	UGB	1,0	0,2	7,0
Evacuation des déjections par flottation ²	UGB	0,5	0,5	6,0
Porcins				
Eau pour le nettoyage de la porcherie et des soins aux animaux ³	PPE ⁹	0,04		0,5
Volaille				
Eau pour le nettoyage des poulaillers de poules pondeuses ³	1'000 PP ¹⁰	0,2		2,5
Eau pour le nettoyage des poulaillers de volaille à l'engrais ³	1'000 PE ¹¹	0,4		5,0
Jus d'écoulement de la fumière , des aires d'exercice imperméabilisées et exposées à la pluie, des plateformes de silo-couloirs exposées à la pluie, dont toutes les eaux sont évacuées vers la fosse à lisier/purin, etc.	m ² et 100 mm de précipitations	0,1		1,2
Plateformes de silo-couloirs exposées à la pluie dont les eaux sont évacuées par une rigole à jus de silo ⁴	m ² et 100 mm de précipitations	0,025		0,3
Eaux de lavage				
Chambre à lait	Postes de traite (PT)	0,5 + 0,05 × PT		6 + 0,6 × PT
Citerne de refroidissement ⁵	Volume de la citerne (L)	0,0015 × L		0,018 × L
Installation de traite à pots	Poste de traite (PT)	3 + 0,5 × PT		36 + 6 × PT
Installation de traite directe (salle de traite ou étable à stabulation entravée)	Poste de traite (PT)	4 + 0,5 × PT		48 + 6 × PT
Stalles dans la salle de traite ⁶	Stalle (S)	0,5 × S		6 × S
Installation de traite automatique ⁷	Unité	25		300
Eaux usées domestiques⁸				
Conditions usuelles (lave-linge, douche/bain et WC)	Habitant	5,0		60
Installations sanitaires simples	Habitant	3,5		42
Cas particuliers avec quantités d'eaux usées régulièrement inférieures à la normale	Habitant	2,0		24

¹ La quantité d'eau indiquée suffit en général pour le bon fonctionnement de l'évacuation continue du lisier/purin avec bec de retenue.

² Cette quantité est généralement ajoutée à celle du nettoyage normal des étables. Elle est nécessaire au bon fonctionnement du système et, par conséquent, ne peut guère être réduite durant l'hiver.

³ En l'absence d'un nettoyeur à haute pression, la quantité d'eau est considérablement plus grande. De l'eau de nettoyage n'est en principe produite qu'au terme d'une série.

⁴ Les eaux pluviales non polluées recueillies sur la plateforme du silo sont évacuées vers une installation d'infiltration.

⁵ Dans le cas d'un nettoyage journalier.

⁶ Par stalle sur quai y compris le nettoyage de la fosse de traite. Carrousel de traite: il faut tenir compte des indications du fabricant.

⁷ 0,5 à 0,8 litre d'eau usée par kg de lait et par an. Dans certains cas, la quantité peut être encore plus élevée.

⁸ Il faut vérifier que l'écoulement des eaux usées aboutisse réellement dans la fosse lisier/purin selon les indications de l'OFEV et OFAG (2011).

⁹ Place de porc à l'engrais.

¹⁰ Places de poules pondeuses.

¹¹ Places de poulets à l'engrais.

volaille se révèle plus élevée qu'en production classique à cause de l'interdiction des phytases. Le conditionnement des engrais de ferme peut modifier sensiblement les teneurs en éléments nutritifs (chapitre 2.4).

2.3 Disponibilité de l'azote dans les engrais de ferme

Partout où l'on stocke ou épand des engrais de ferme, il y a des pertes de N, essentiellement sous forme de NH₃. Pour les pertes inévitables à l'étable et pendant le stockage, on compte normalement 20 % du N contenu dans les déjections chez les bovins en stabulation libre, 15 % en stabulation entravée; chez les porcs, ce sont 20 % de pertes et 30 à 50 % pour la volaille. Pour le calcul des valeurs indicatives des teneurs relatives aux engrais de ferme des bovins (tableau 6), on s'est basé sur les pertes inévitables des stabulations libres.

Lors de l'épandage de lisier/purin ou de fumier, il y a également des pertes de N par volatilisation du NH₃. Il faut ajouter qu'une partie du N dans le lisier/purin et le fumier est liée à la matière organique; il n'est de ce fait pas immédiatement disponible pour les plantes. Ce N s'intègre donc à la matière organique du sol et ce n'est qu'après un long processus de métabolisation par minéralisation – qui peut s'étaler sur plusieurs années pour certaines fractions – qu'il devient disponible pour les plantes. Le moment et l'intensité du processus de minéralisation sont très difficiles à évaluer. Le N_{disp} dans les engrais de ferme correspond à la quantité de N_{disp} pour les plantes sur une période d'environ trois ans, dans le cas d'une gestion optimale des engrais de ferme. Il contient une part de N_{sol} qui, après un épandage soigné avec peu de pertes, est rapidement à disposition des plantes; une autre partie n'est disponible qu'à moyen terme (deux à

Tableau 6. Teneurs indicatives en matière sèche (MS), en matière organique (MO) et en éléments nutritifs des engrais de ferme pour différentes espèces d'animaux de rente en stabulation.

Type d'engrais de ferme/Type d'animal	Teneurs (kg/m ³ de lisier/purin non dilué et kg/t de fumier)										
	MS	MO	N _{tot} ³	N _{sol} ³	N _{disp} ³	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O	Mg	Ca
Vache/bovin d'élevage											
Lisier ¹	90	70	3,9	2,1	2,0–2,7	0,74	1,7	6,2	7,5	0,61	1,5
Purin ¹	75	40	4,5	2,9	2,9–3,8	0,47	1,1	9,0	11	0,58	1,0
Fumier au tas ²	190	150	4,5	0,7	0,9–1,8	1,3	3,0	5,1	6,1	0,93	3,0
Fumier de stabulation libre ²	210	175	4,9	1,2	1,2–2,5	0,94	2,2	8,4	10	0,82	2,2
Bovin d'engraissement											
Lisier ¹	90	65	4,0	2,1	2,0–2,8	0,55	1,3	3,7	4,5	0,37	1,2
Fumier de stabulation libre ²	210	155	4,1	1,0	1,0–1,8	0,57	1,3	4,4	5,3	0,42	1,5
Veau											
Fumier de veau ²	200	150	5,0	1,9	1,3–2,5	1,1	2,5	4,7	5,7	0,89	1,7
Cheval											
Fumier de cheval frais ²	350	300	4,4	1,2	0,3–0,8	1,1	2,5	8,1	9,8	0,6	2,5
Fumier de cheval mûr ²	350	240	6,8	0,7	0,7–1,8	2,2	5,0	16,2	19	1,3	5,0
Mouton/chèvre											
Fumier de mouton/chèvre ²	270	200	8,2	2,4	3,3–4,9	1,6	3,7	14	17	1,3	4,9
Porc											
Lisier de porc, engrais ^{1, 4}	50	36	6,5	4,6	3,3–4,6	1,4	3,2	3,0	3,6	0,88	2,1
Lisier de porc d'élevage ^{1, 5}	50	33	4,7	3,3	2,4–3,4	1,2	2,7	2,5	3,0	0,56	1,5
Fumier de porc ²	270	230	8,8	2,6	3,5–5,3	2,9	6,6	6,0	7,3	1,5	5,0
Volaille											
Crottes de poules/poulettes (tapis à crottes) ²	350	250	21	6,3	8,4–13	7,4	17	9,3	11	2,4	37
Fumier de poule/poulette (Fosse à crottes, élevage au sol) ²	500	330	26	7	11–16	13	30	17	20	4,3	67
Fumier de poulet ^{2, 6}	650	440	32	10	13–19	7,5	17	23	28	5,5	5
Fumier de dinde ²	600	400	28	7,5	12–18	10	23	10,8	13	6,0	12

¹ Les teneurs du lisier/purin se rapportent à du lisier/purin non dilué. Les dilutions provenant de l'apport d'eaux usées doivent être prises en compte selon le tableau 5. Exemple avec une dilution 1:1,5 (part de lisier/purin:part d'eau): teneur du lisier/purin non dilué / (1 + 1,5).

² Sauf indication contraire, les valeurs se rapportent à du fumier moyennement décomposé (annexe 1).

³ Pour les données sur les formes et les pertes de N, voir chapitre 2.3.

⁴ Des détails à propos de la note 4 se trouvent dans le tableau 3.

⁵ Des détails à propos de la note 5 se trouvent dans le tableau 3.

⁶ Valable indépendamment de la durée d'engraissement dans les systèmes les plus courants.

trois ans après l'épandage de l'engrais de ferme); ensemble, ces deux fractions représentent la quantité de N dans la matière qui est minéralisable. Le tableau 7 indique l'effet moyen de différents engrais de ferme durant l'année d'épandage et l'effet de ce N à moyen terme.

Pour les parcelles qui reçoivent régulièrement des engrais de ferme, on peut directement prendre en considération les valeurs de la première colonne du tableau 7; on admet, par cette simplification, que l'arrière-effet des apports d'engrais de ferme antérieurs peut être pris en compte. En production fourragère, il faut choisir plutôt la valeur supérieure, et pour les grandes cultures la valeur inférieure. Pour estimer la quantité de N dans le lisier/purin disponible l'année d'épandage, on peut se baser sur la teneur en N ammoniacal (NH₄⁺-N). Ce N peut être déterminé à la ferme avec suffisamment de précision au moyen d'un test rapide (chapitre 2.5.2). La différence entre le N_{tot} épandu et le N_{disp} dans les engrais de ferme correspond aux pertes de NH₃ survenues après l'épandage et à la part de N lié à la matière

organique qui est stocké dans le sol sous la forme de substance organique (humus) pendant une longue période.

Si les engrais de ferme ne sont pas épandus à une période optimale (figure 3) (en automne, après la fin de la période de végétation, par des conditions météorologiques défavorables ou un mauvais état du sol, etc.), l'efficacité du N peut être nettement moindre. Il en résulte qu'une partie du N_{disp} non utilisé va se perdre par lixiviation, ruissellement ou volatilisation. Ces pertes de N chargent l'environnement et doivent donc être réduites au maximum. De plus, c'est une perte économique s'il faut remplacer ce N perdu par de l'engrais.

2.4 Traitement des engrais de ferme

2.4.1 Fermentation anaérobie

Un lisier/purin qui a subi une fermentation anaérobie (sans contact avec de l'air) voit ses propriétés modifiées par rapport à du lisier/purin non fermenté et il y a lieu d'en tenir

Tableau 7. Proportion de N_{disp} à moyen terme et durant l'année de l'épandage dans différents engrais de ferme.

Type d'engrais de ferme	N_{disp} à moyen terme en % de la teneur en N_{tot} ¹	N_{disp} l'année de l'épandage en % de la teneur en N_{tot} ²	
		Cultures fourragères	Grandes cultures
Lisier (bovin)	50–70	55	45
Purin de bovin	65–85	70	60
Fumier au tas	20–40 ³	20	15
Fumier de stabulation libre	25–50 ³	25	20
Fumier de cheval	10–25 ³	15	10
Fumier de mouton/chèvre	40–60 ³	40	30
Lisier de porc	50–70	60	50
Fumier de porc	40–60 ³	4	35
Crottes de poules (tapis roulant)	40–60 ³	4	40
Fumier de poule (fosse à crottes, élevage au sol)	40–60 ³	4	35
Fumier de volaille (engraissement), poulet, dinde	40–60 ³	4	35

¹ Ce niveau de disponibilité peut être atteint par une valorisation optimale des engrais de ferme et ceci dans la moyenne des conditions pédo-logiques et climatiques de la Suisse. Il inclut la disponibilité à court terme et l'arrière-effet durant les années qui suivent (voir aussi la définition de N_{disp} dans l'annexe 1).

Pour les parcelles qui reçoivent régulièrement des engrais de ferme, ces valeurs de disponibilité peuvent être prises en compte pour le calcul de la fumure, car l'arrière-effet est automatiquement pris en compte. Dans les cas d'apports sporadiques de fumier, l'action du N peut être répartie sur deux à trois ans. Pour le lisier/purin, cette différenciation n'a guère de sens.

En cultures fourragères, il faut prendre en compte plutôt la valeur supérieure, tandis que pour les grandes cultures, il faut choisir la valeur inférieure.

² Disponibilité du N l'année de l'épandage en conditions optimales et de moindres pertes. Le reste du N est minéralisé au cours des années qui suivent. La minéralisation dépend fortement des conditions du sol et du climat. Selon le moment de la minéralisation, l'effet de la libération du N peut être agronomique ou écologique (rendement et qualité des plantes ou pertes) (voir aussi la définition de N_{disp} dans l'annexe 1).

³ Dans les sols avec un taux d'argile supérieur à 30 %, on ne peut guère compter plus que la valeur inférieure de la fourchette pour la disponibilité à moyen terme, souvent elle est encore sensiblement plus basse. Dans ces conditions, la disponibilité au cours de l'année de l'épandage est aussi moindre.

⁴ L'utilisation de ce type d'engrais de ferme n'est pas recommandée sur les prairies naturelles.

compte pour la fertilisation des cultures. La fermentation du lisier/purin dans une installation de méthanisation décompose la matière organique et réduit la teneur en matière organique ainsi que la viscosité. De ce fait, le lisier/purin est plus liquide et pénètre plus facilement dans le sol lors de l'épandage, ce qui permet de réduire les pertes de N par volatilisation.

La décomposition de la matière organique du lisier/purin durant la fermentation entraîne une minéralisation du N lié à la matière organique qui libère du NH_4^+ . Il y a donc une augmentation de la concentration en N ammoniacal dans le lisier/purin fermenté et une diminution du N lié à la matière organique. Il en résulte une plus grande disponibilité du N du lisier/purin pour les plantes qui rend le calcul de l'effet fertilisant du lisier/purin plus facile.

Au cours de l'année d'épandage, la valeur fertilisante azotée des liquides issus d'installations de biogaz agricoles vaut au moins celle des engrais de ferme (tableau 7). Par l'augmentation de la teneur en NH_4^+ et la diminution simultanée des composés carbonés facilement utilisables par les microorganismes, le rapport carbone (C):N est plus étroit et il en résulte une moindre immobilisation du N ammoniacal dans le sol. Il s'ensuit en général une meilleure utilisation du N l'année de l'épandage pour autant que celui-ci ait été réalisé de manière à minimiser les pertes (p. ex. au moyen d'une rampe à pendillards). L'efficacité azotée du lisier/purin fermenté (seul ou avec d'autres sub-

strats) est augmentée de 10 à 25 % (Bosshard *et al.* 2010; Möller et Müller 2012; Webb *et al.* 2013).

Le pH du lisier/purin augmente pendant la fermentation, car une partie du N lié à la matière organique est transformée en $(NH_4)_2CO_3 \cdot H_2O$ (carbonate d'ammonium). Cependant, cette augmentation du pH et de la teneur en N ammoniacal augmente les pertes potentielles de N par volatilisation en cas de stockage et d'épandage inadéquats.

2.4.2 Séparation solides/liquides

Ce procédé mécanique sépare les parties solides du lisier (qui contiennent le P à action lente) de la partie liquide, le purin clair, qui contient entre autres des éléments nutritifs solubles à action rapide. Cette séparation confère au purin clair les avantages suivants par rapport au lisier qui n'a pas été séparé:

- réduction du volume;
- pas de couche flottante, donc en général il n'est pas nécessaire de brasser avant l'épandage;
- pas de bouchons dans le système d'épandage;
- écoulement rapide de la surface des plantes;
- meilleure infiltration dans le sol;
- moins d'émissions de NH_3 ;
- amélioration de l'efficacité du N.

Il y a néanmoins un désavantage: il faut deux volumes de stockage, dont un couvert pour la phase liquide.

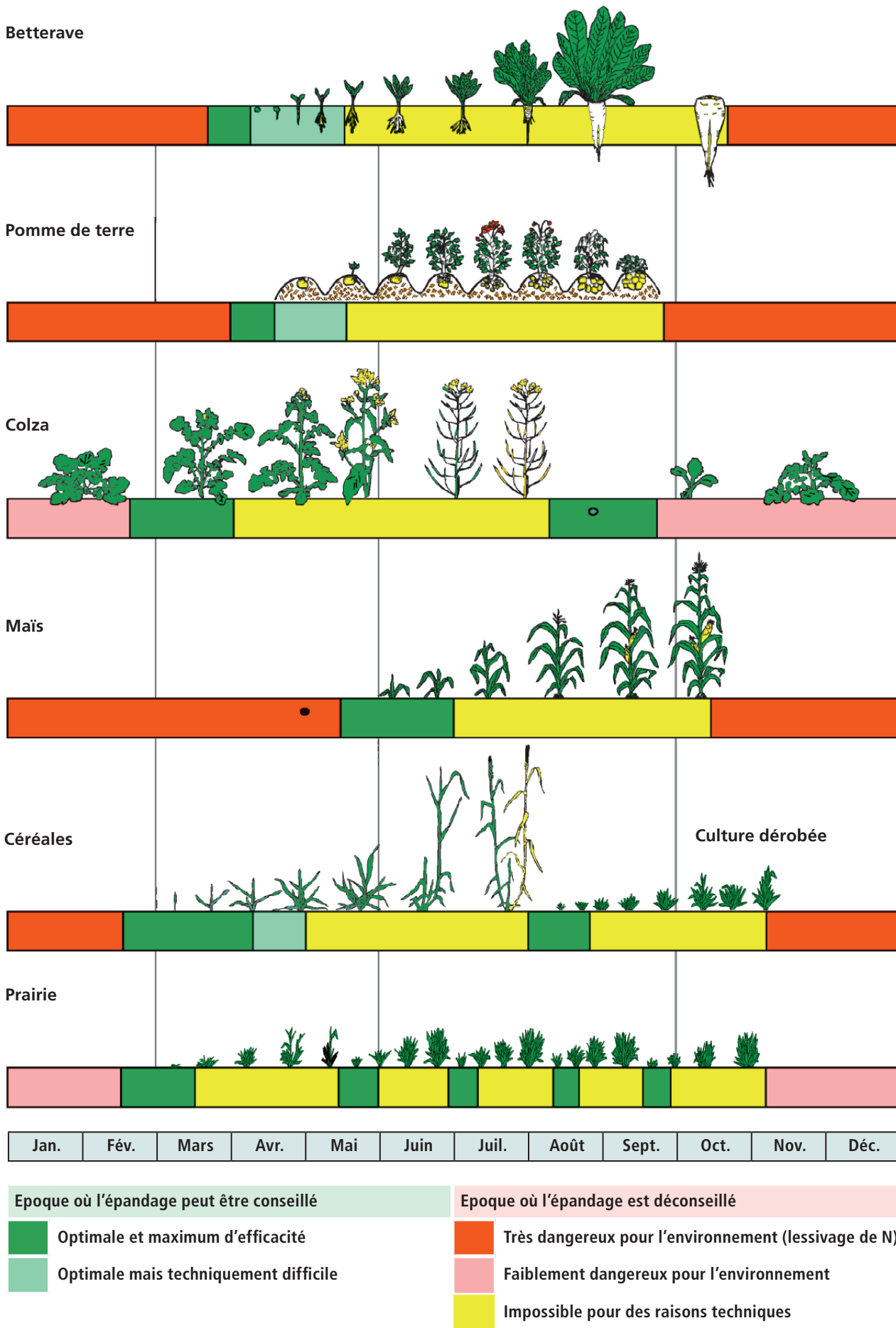


Figure 3. Représentation schématique des possibilités d'épandage du lisier/purin en fonction du développement des cultures et des risques pour l'environnement. Le calendrier doit être adapté en fonction du site.

Le purin clair peut être utilisé tant en grandes cultures qu'en cultures fourragères. La partie solide peut être utilisée comme engrais en grandes cultures, mélangée avec du compost ou composté (pour une teneur en MS supérieure à 25 %).

2.4.3 Additifs au lisier/purin

Les additifs au lisier/purin existent en nombre sur le marché. Les effets qui leur sont attribués sont rarement consolidés, étant plus souvent dus à une gestion soignée du lisier/purin. Un aperçu de ces additifs et de leur mode d'action peut être trouvé dans les publications, par exemple celle de l'ADCF (1999) ou celle de l'« IBK Arbeitsgruppe Landwirtschaft und Umweltschutz » (2009).

2.4.4 Aération du lisier/purin

La technique d'aération du lisier/purin n'est plus guère utilisée, n'apportant aucun avantage décisif ni sur l'aspect agronomique ni sur le plan écologique. Le procédé a néanmoins des avantages par rapport à la fermentation anaérobie en ce qui concerne les émissions d'odeurs. Mais le procédé est coûteux, tant à l'installation qu'à l'exploitation. Dans le cas d'une aération incorrecte (trop intensive ou trop fréquente), d'importantes pertes de N sous la forme d'émissions de NH_3 sont inévitables.

2.5 Utilisation des engrais de ferme

2.5.1 Capacité de stockage des engrais de ferme et périodes d'épandage du lisier/purin et du fumier

Le lisier/purin et le fumier sont produits tout au long de l'année. Les moments où ils peuvent être épandus dépendent cependant du genre de culture, de ses besoins en éléments nutritifs, du stade de développement des plantes ainsi que du site et des conditions météorologiques, qui peuvent être des facteurs limitants (aptitude du sol au trafic des véhicules, risques de pertes d'éléments nutritifs). La condition préalable pour pouvoir épandre les engrais de ferme au moment optimal, sans être contraint de les évacuer en dehors de la période de végétation, consiste à disposer d'une capacité de stockage suffisante (figure 4). Cette capacité de stockage devrait être conforme aux prescriptions de l'OFEV et de l'OFAG (2011), soit une capacité de stockage couvrant au moins cinq mois en zone de plaine et de collines¹ et six mois dans les zones de montagne I à IV. La figure 3 montre pendant quelles périodes et pour quelles cultures un épandage des engrais de ferme est judicieux et possible.

2.5.2 Critères pour déterminer les quantités d'engrais de ferme à épandre

La quantité d'engrais de ferme dépend d'abord des besoins des cultures en N et en P ainsi que des teneurs en N et en P disponibles dans l'engrais de ferme concerné; pour les épandages fractionnés, les besoins en N sont déterminants, tan-

dis que pour un seul épandage dans la saison ou la quantité totale, le P est déterminant. Pour mesurer la teneur en NH_4^+ du lisier/purin avec une précision suffisante, les tests rapides conviennent très bien (p. ex. Güllemax).

En général, les apports fractionnés de lisier/purin sont de 20 à 30 m^3/ha en cultures fourragères et de 30 à 40 m^3/ha en grandes cultures; pour le fumier au tas, on recommande de ne pas dépasser 20 t/ha de fumier décomposé (BDU 2004).

Avec des quantités plus importantes et/ou avec des teneurs en N ammoniacal plus élevées ou encore par des techniques d'épandage non optimales, le risque de pertes d'éléments nutritifs, d'ammoniac en particulier, croît fortement (tableau 2, module 5). Des recommandations pour éviter des pertes d'éléments nutritifs à l'épandage des engrais de ferme se trouvent dans le module 7.

Quant aux quantités maximales épandables, il faut se conformer aux limitations figurant dans les tableaux 3 et 4 du module 7. Les quantités de P, de K et de Mg épandues au cours de l'année doivent être récapitulées et prises en compte pour la prochaine fertilisation de fond. On admet que l'action du P, du K et du Mg a été complète au cours de l'année d'épandage. Avec le lisier/purin, la quantité épandue ne devrait pas dépasser, pour aucun élément nutritif, les besoins des plantes corrigés d'après les résultats des analyses de sol.



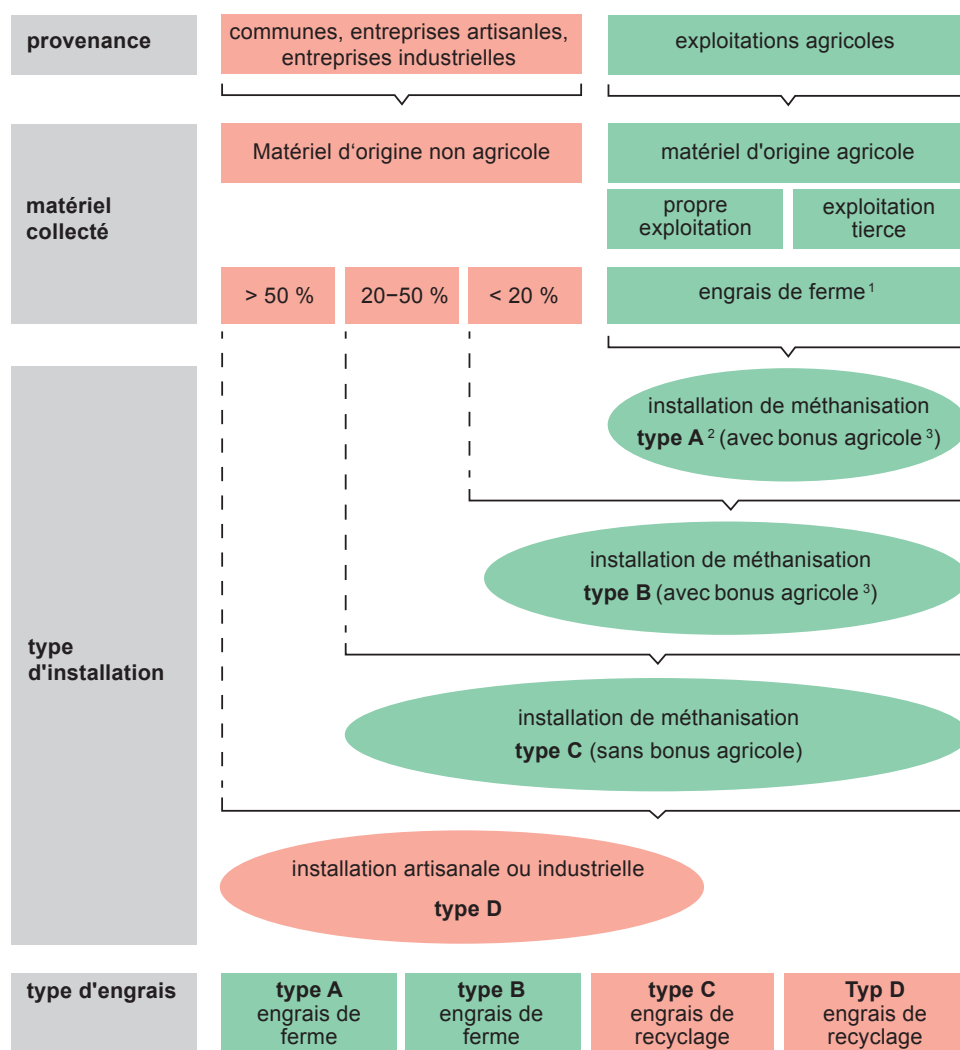
Figure 4. La condition préalable pour pouvoir épandre les engrais de ferme au moment optimal, sans être contraint de les évacuer en dehors de la période de végétation, consiste à disposer d'une capacité de stockage suffisante (photo: Gabriela Brändle, Agroscope).

3. Engrais de recyclage et produits de méthanisation

3.1 Introduction

Le compost, les digestats solides ou liquides ainsi que le matériel végétal non décomposé sont considérés comme des engrais de recyclage. La constitution d'un compost est correcte s'il est fait à partir de produits végétaux, animaux ou bactériens ayant subi une fermentation aérobie; les digestats solides ou liquides sont issus de la fermentation des mêmes matériaux que pour le compost, mais en condi-

¹ Selon ordonnance sur le cadastre de la production agricole et la délimitation de zones (ordonnance sur les zones agricoles, RS 912.1).



¹ Si l'engrais de ferme contient du matériel d'origine non agricole, comme l'autorise l'OEng (max. 20 %), celui-ci doit être comptabilisé.

² Les installations de méthanisation de type A fermentent uniquement des intrants d'origine agricole. Un engrais de ferme qui contient des intrants d'origine non agricole selon l'OEng (max. 20 %) ne peut donc pas être valorisé dans une installation de méthanisation de type A.

³ En ce qui concerne le bonus pour la biomasse issue de l'agriculture, la proportion de cosubstrats non agricoles et de plantes énergétiques doit être inférieure ou égale à 20 % de la masse de matière fraîche (appendice 1.5, ch. 6.5 let. e OEng).

Figure 5. Classification des digestats en engrais de ferme ou en engrais de recyclage (selon Agridea et OFAG, 2013, modifié). Les produits de méthanisation des installations agricoles ayant transformé plus de 20% de matière fraîche d'origine non-agricole, sont considérés comme des engrais de recyclage.

tions anaérobies; ils proviennent généralement d'installations industrielles (figure 5).

Selon l'ordonnance sur les engrais (OEng, art. 5), les digestats sont considérés comme liquides si leur teneur en MS est inférieure à 20 %. Toutefois, des digestats liquides issus de la fermentation de produits solides peuvent être plus riches en MS (tableau 8). Les produits d'installations de méthanisation agricoles sont considérés comme engrais de recyclage si les engrais de ferme sont fermentés avec plus de 20 % de matériel d'origine non agricole (figure 5, OEng).

A côté des composts et des digestats, qui représentent la part la plus importante des engrais de recyclage, il existe des engrais organiques du commerce qui proviennent de sous-produits de la transformation de produits animaux ou végétaux. Comme exemple, on peut citer les copeaux de cornes ou des extraits de mélasse. Compte tenu de leur coût relativement élevé par unité nutritive, ils sont utilisés plutôt en cultures biologiques à haute valeur ajoutée (par exemple cultures spéciales, pommes de terre).

3.2 Teneur en éléments nutritifs dans les engrais de recyclage et les produits de méthanisation

Les teneurs en éléments nutritifs dans les digestats et les composts peuvent être très variables (tableau 8). Il est dès lors préférable de recourir à des résultats d'analyse plutôt qu'aux valeurs indicatives du tableau 8. Le calcul des apports d'engrais doit tenir compte des besoins des plantes en éléments nutritifs, des teneurs en éléments nutritifs des engrais, de l'efficacité des engrais à épandre, de l'arrière-effet d'apports d'engrais antérieurs et de l'état de fertilité du sol. Grâce au contrôle de routine des engrais de recyclage, on est assuré que seuls des engrais de recyclage pauvres en substances indésirables sont épandus.

3.3 Indications générales pour l'utilisation des composts et des produits de méthanisation issus d'installations artisanales et industrielles

Dans un laps de temps de trois ans, et dans les limites des besoins des plantes, on peut épandre comme engrais jusqu'à 25 t/ha de compost ou de digestats solides (la teneur en MS est déterminante) ou 200 m³/ha de digestats

Tableau 8. Teneurs moyennes (valeurs médianes) en matière sèche (MS), en matière organique (MO) et en éléments nutritifs dans les engrais de recyclage issus d'installations artisanales ou industrielles.

	Engrais de recyclage		
	Digestats solides ¹ (IAI ³)	Digestats liquides ¹ (IAI ³)	Compost ²
	kg par t de matière fraîche		
MS	490	130	510
min ⁴	290	50	220
max ⁵	820	230	930
n ⁶	197	106	1041
MO	235	61	214
min	44	47	46
max	368	77	480
n	197	106	1041
N_{tot}	6	4	7
min	2	2	2
max	14	8	15
n	197	106	1039
N_{sol}⁷	0,3	2	0,3
min	0,005	1	0,01
max	2,5	5	3
n	197	82	362
N_{disp} (%)	8	8	5–10
P (P₂O₅)	1,3 (3)	0,9 (2)	1,3 (3)
min	0,4 (1)	0,4 (1)	0,4 (1)
max	3,5 (8)	1,7 (4)	6,5 (15)
n	197	106	1038
K (K₂O)	4,2 (5)	3,3 (4)	4,2 (5)
min	1,7 (2)	0,8 (1)	1,7 (2)
max	12,5 (15)	6,6 (8)	14 (17)
n	197	106	1038
Mg	3	1	3
min	1	0,5	0,5
max	7	2	10
n	197	106	1038
Ca	25	5	25
min	11	3	7
max	80	11	28
n	197	106	943
Teneur en sel (mS/cm)⁹	3	12	3
min	0,6	7	0,6
max	8	30	8
n	197	82	481

¹ Actuellement, la base de données se rapportant aux produits de méthanisation des installations de biogaz agricoles est trop petite pour pouvoir fournir des valeurs fiables.

² Données se rapportant à des composts faits de déchets organiques provenant des ménages et des jardins. Les valeurs indiquées sont la médiane des valeurs provenant de divers types de composts: compost frais, compost mûr, compost de bord de champ. Leur poids volumique est de 500 à 800 kg/m³.

³ Installations de méthanisation artisanales ou industrielles (IAI).

⁴ Valeur minimale.

⁵ Valeur maximale.

⁶ Nombre d'échantillons analysés.

⁷ N minéral, hydrosoluble, rapidement disponible pour les plantes (somme des teneurs en N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻).

⁸ La base de données actuelle est encore trop petite pour en tirer des valeurs suffisamment sûres quant à la disponibilité moyenne du N des produits de méthanisation.

⁹ Teneur en sels (mS/cm) < 1: basse, pas de dégâts aux plantes; 1–2: normale, pas de dégâts aux plantes; 2–4: moyennement élevée, dégâts possibles sur les plantes sensibles aux sels; > 4: élevée, dégâts sur de nombreuses plantes. Avec des teneurs en sel supérieures à 2 mS/cm, il est déconseillé d'épandre ces produits sur de jeunes plantes qui pourraient se révéler très sensibles aux sels (p. ex. maïs, pomme de terre, haricot, pois, trèfle violet, tabac).

liquides. Par période de 10 ans, au maximum 100 t de compost et de digestats solides (selon la teneur en MS) peuvent être apportées à titre d'amendement du sol, de substrat, de protection contre l'érosion, pour la remise en culture ou comme terre artificielle (ORRchim, annexe 2.6, 3.2.2).

Lors de l'épandage des digestats liquides, on doit appliquer les mêmes principes que pour les engrais de ferme (voir chapitre 2.5 et module 7). Les digestats solides peuvent être épandus tels quels, mélangés au compost ou compostés.

D'autres recommandations d'utilisation pour les digestats solides ou liquides ainsi que pour les composts sont contenues dans la Directive suisse 2010 de la branche sur la qualité du compost et du digestat (Abächerli et al. 2010).

4. Engrais minéraux

4.1 Introduction

Après les engrais de ferme, les engrais minéraux constituent la source la plus importante d'éléments nutritifs apportés aux plantes. Ils contiennent du N, du P, du K, du Mg, du soufre (S), du calcium (Ca) et différents microéléments, formulés en engrais simples ou composés.

Dans de nombreux cas, les engrais minéraux ne jouent qu'un rôle complémentaire par rapport aux engrais de ferme et de recyclage. Avec les engrais composés, on épand plusieurs éléments nutritifs en un seul passage, ce qui est plus économique. Si l'on veut tenir compte des disponibilités dans le sol, des besoins des cultures et du stade où les éléments nutritifs doivent être disponibles, il est souvent difficile de trouver l'engrais qui a la composition adéquate. Du point de vue tant agronomique qu'écologique, il est parfois plus judicieux d'apporter les éléments nutritifs manquants sous forme d'engrais simples.

Pour pratiquer une fertilisation conforme aux besoins des plantes et qui préserve l'environnement, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des engrais et de leurs propriétés. Ces informations de base se trouvent dans les chapitres suivants.

4.2 Principales propriétés des engrais minéraux

4.2.1 Engrais azotés

Les formes de N contenues dans les engrais minéraux sont généralement plus vite disponibles pour les plantes que le N lié à la matière organique. Ces engrais peuvent être appliqués de manière plus ciblée (tableau 9). Pour une action rapide, on utilise un engrais contenant des nitrates, tandis que les engrais contenant du NH₄⁺ ont un effet légèrement retardé. Cette propriété du NH₄⁺ est d'ailleurs à la base du système de fertilisation CULTAN (module 5). Le N uréique n'est disponible qu'après une métabolisation microbienne, ce qui en retarde l'effet. L'urée est toutefois l'engrais azoté le meilleur marché par unité de N. Il comporte cependant des risques de pertes non négligeables de N ammoniacal, particulièrement en sols alcalins et en conditions sèches

Forme de N	Propriétés	Principes d'utilisation
Nitrate (salpêtre), NO_3^-	Action rapide; risque de lessivage élevé	Moment d'application et quantité selon les besoins des cultures à court terme
Ammonium, NH_4^+	Action retardée et durable; risque de volatilisation élevé	Incorporer au sol lors de longues périodes sans pluie
Nitrate d'ammonium (nitrate d'ammoniaque), $\text{NH}_4^+\text{NO}_3^-$	Action en partie rapide et en partie retardée	Incorporer au sol lors de longues périodes sans pluie
Urée, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	Action retardée et durable; risque de volatilisation élevé	En sols neutres ou alcalins, incorporer légèrement; ne pas utiliser sur prairie en périodes de beau temps
N lié à la matière organique, R-NH_2	Action lente à très lente, incertaine; Minéralisation par les microorganismes du sol incontrôlable, avec des risques de pertes de nitrates par lessivage	Epandre des quantités modestes et régulières plutôt que des grosses quantités en une fois. Éviter les périodes de jachère pendant la période de végétation, car une minéralisation incontrôlable pourrait induire d'importantes pertes de nitrates par lessivage

Forme de P	Propriétés	Principes d'utilisation
Soluble à l'eau (p. ex. superphosphate, superphosphate triple)	Action rapide dans tous les sols, léger effet acidifiant	Utilisation régulière en sols neutres et alcalins; en sols acides, utilisation sporadique
Soluble au citrate d'ammonium (p. ex. phosphate de Rhénanie)	Action rapide pour une part, lente pour une autre	Utilisation en sols pauvres en P avec un pH < 6,6; en sols normalement pourvus avec un pH < 7,5
Soluble à l'acide citrique (p. ex. scories de Thomas, scories de Thomas calciques, poudre d'os)	Action lente; léger effet chaulant; contribue à la stabilité du pH dans les sols faiblement acides	Utilisation en sols pauvres en P avec un pH < 6,2; en sols bien pourvus avec un pH < 7,5
Phosphate naturel (p. ex. hyperphosphate)	Action très lente	Utilisation en sols acides (pH < 5,8) et en sols légèrement acides (pH 5,9 à 6,7)
Organique	Action lente à très lente; Ne devient disponible pour les plantes qu'après décomposition de la matière organique par les microorganismes du sol et par conversion enzymatique	Utilisation visant à maintenir la teneur en P dans les sols suffisamment pourvus; action retardée au printemps, particulièrement si le sol est froid

(l'engrais reste plus longtemps en surface), les émissions de NH_3 augmentant parallèlement au pH du sol.

Dans le but de réduire les coûts par le nombre de passages pour des applications d'engrais fractionnées, tout en diminuant le risque de pertes de N après l'épandage, le commerce propose des engrais dits stabilisés parce qu'ils contiennent un inhibiteur de nitrification. On en attend des avantages particuliers, notamment une diminution du risque de lessivage ou de dénitrification du N contenu dans l'engrais, dans le cas d'un épandage anticipé en régions sèches ou d'un épandage tardif, pour lequel une incorporation au sol n'est plus possible. De tels engrais sont naturellement plus chers et il s'agit de mettre en balance les coûts d'épandage spécifiques à l'exploitation.

4.2.2 Engrais phosphatés

Les engrais phosphatés sont caractérisés par la solubilité de leur P (tableau 10). Lors du traitement thermique et chimique du phosphate naturel, la structure de l'apatite est désagrégée et le phosphate devient de plus en plus soluble. Le P soluble à l'eau est totalement disponible pour les plantes.

Lorsque le traitement thermique est complet, le phosphate naturel est transformé pratiquement entièrement en phos-

phate soluble sous l'action de l'acide sulfurique ou de l'acide phosphorique. Pour abaisser les coûts de production, on procède à un traitement thermique partiel, avec moins d'acides. Il en sort des engrais avec diverses proportions de P solubles aux acides minéraux ou à l'eau. Les phosphates non traités des engrais qui se retrouvent dans le sol sont attaqués très lentement par l'action d'acides, contenus notamment dans les exsudats racinaires.

Les engrais minéraux phosphatés se différencient par leur vitesse d'action (tableau 10). Le superphosphate a l'action la plus rapide grâce à la solubilité de son P; le phosphate naturel est le plus lent, n'étant disponible pour les plantes qu'après solubilisation par les acides du sol (p. ex. les exsudats racinaires).

Pour choisir l'engrais phosphaté adéquat, il faut connaître le pH du sol: le superphosphate est utilisé pour les sols alcalins à neutres, les autres formes pour les sols légèrement acides à acides.

4.2.3 Engrais potassiques

Toutes les formes d'engrais potassiques sont bien solubles à l'eau, donc rapidement disponibles (tableau 11). Le plus important, pour le choix de la forme de K, sont les substances annexes: les sels de potassium riches en chlore ne

Tableau 11. Propriétés des différentes formes de potassium et d'engrais potassiques.

Forme de K	Propriétés	Utilisation
Chlorure de potassium (p. ex. sels de potassium)	Soluble à l'eau; action rapide; risques de lessivage dans les sols sableux; contient 40–50 % de chlore	Limiter les apports à 300 kg K ₂ O/ha, soit 249 kg K/ha; en sols très sableux, épandre au printemps; dosage réduit pour les cultures sensibles au chlore (p. ex. pommes de terre, tabac, différents légumes et petits fruits)
Sulfate de potassium (p. ex. sulfate de potassium, Patentkali/potasse magnésienne)	Soluble à l'eau; action rapide; contient 15–20 % de S	Utilisation sur cultures sensibles au chlore, sur les cultures aux besoins en S élevés et sur cultures avantagées en sols acides
Nitrate de potassium	Soluble à l'eau; action rapide; contient 13 % de N	Convient pour les applications foliaires; engrais spécial pour cas particuliers (légumes, tabac)

Tableau 12. Propriétés de différentes formes de Mg, S et Ca et de différents engrais à base de ces éléments nutritifs.

Élément nutritif	Forme	Propriétés	Utilisation
Magnésium (Mg)	Sulfate de magnésium (p. ex. kiesérite ou sel d'Epson)	Soluble à l'eau; action rapide; risque de lessivage en sols légers	Utilisation en cas de carence aiguë en magnésium (application foliaire ou épandage de kiesérite au sol); sel d'Epson en sols légers, à appliquer au printemps
	Carbonate de magnésium	Peu soluble; action lente, mais soutenue; faible risque de lessivage	Utilisation en cas de légers manques en sols acides; fertilisation d'entretien en sols peu acides à acides
	Oxyde de magnésium	Action décalée, mais soutenue	Utilisation pour une fertilisation d'entretien en tous types de sol
Soufre (S)	Sulfate (p.ex. kiesérite, sel d'Epson)	Soluble à l'eau; action rapide; risque d'être lessivé	Moment d'application et quantité en fonction des besoins des cultures à court terme (utilisation comme celle des engrais minéraux azotés)
	Soufre élémentaire	Action lente; sous cette forme, n'est pas disponible pour les plantes; doit être préalablement transformé en sulfate par les bactéries du sol	Épandre tôt (évent. en automne déjà); n'est pas adéquat en cas de carence aiguë en S
	Soufre lié à la matière organique	Action lente et imprévisible; minéralisation par les microorganismes du sol incontrôlable; fraction minéralisée exposée au lessivage	Éviter des apports massifs uniques; préférer de petits apports réguliers
Calcium (Ca)	Chlorure de calcium	Soluble à l'eau; action rapide	Utilisation en cas de carence en Ca aiguë (application foliaire)
	Sulfate de calcium (gypse)	Peu soluble à l'eau	Amendement du sol pour augmenter sa teneur en Ca sans élever le pH

devraient pas être épandus sur les cultures sensibles, éventuellement seulement à dose réduite. Le sulfate de potassium est approprié pour être épandu sur les cultures sensibles. Les engrais à base de sulfate de potassium conviennent aussi pour couvrir les besoins en S des cultures.

4.2.4 Autres engrais minéraux (magnésium, soufre et calcium)

Il y a deux catégories d'engrais magnésiens: l'une agit rapidement grâce au sulfate de magnésium soluble à l'eau, indiqué en cas de carence en Mg; l'autre est à base de carbonate et d'oxyde de magnésium qui agissent plus lentement, ce qui les destine à une fertilisation Mg d'entretien (tableau 12).

Le S est utilisé généralement sous forme de sulfate (SO₄²⁻) qui agit plus rapidement que le S lié à la matière organique, celui des engrais de ferme par exemple (tableau 12). Le S élémentaire ou sous forme de sulfate est contenu

dans divers engrais (tableau 13) qui sont utilisés avant tout comme engrais N, P, K ou Mg.

Il est rarement nécessaire d'appliquer une fertilisation à base de Ca uniquement, cet élément étant généralement présent dans le sol en quantités suffisantes. Les plantes absorbent le Ca seulement sous la forme de cation bivalent (Ca²⁺). Les teneurs du sol en Ca étant généralement élevées, cet élément est exposé au lessivage. S'il s'avère nécessaire de compléter l'apport de Ca, il faut effectuer ce complément par une application foliaire car, dans la plupart des cas, l'apport est destiné à des parties de la plante seulement, les feuilles ou les fruits par exemple.

4.2.5 Autres engrais minéraux (microéléments)

Les microéléments sont souvent présents en quantités suffisantes dans le sol ou sont contenus dans d'autres engrais (minéraux ou organiques) épandus régulièrement. En cas de pH du sol très élevé ou d'apport important de chaux, il

Tableau 13. Teneurs en soufre et autres éléments nutritifs des principaux engrais minéraux.

Engrais	Teneur en soufre (%)	Teneur en éléments nutritifs (%)					
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Mn	Ca
Engrais azotés	Sulfate d'ammoniaque	24	21				
	Sulfonitrate	13	26				
	Sulfonitrate stabilisé (Entec®)	13	26				
	Sulfate d'ammoniaque en solution	9	8				
	Sulfate d'ammoniaque uréique en solution	6	20				
Engrais phosphatés	Superphosphate	12		18			10 ¹
	Superphosphate Mg	6		18	4,0		18 ¹
	NovaPhos 23	8		23			
Engrais potassiques	Sulfate de potassium	18			50		
	Patentkali	17			30	6,0	
	Sel de potasse 40 % avec MgO (potasse granulée)	4			40	3,6	
Engrais magnésiens	Sulfate de Mg (kiesérite; fertilisation de fond)	20				15,0	
	Sulfate de Mg (sel d'Epson; engrais foliaire)	13				9,8	
Autres engrais/ engrais composés	Sulfate de manganèse	15					32
	Gypse (sulfate de calcium)	15					21 ¹
	Kaïnite magnésienne	4			11		3
	Engrais composés	jusqu'à 8	selon indications du fabricant				
	Engrais foliaires	jusqu'à 18	selon indications du fabricant				

¹ Teneur en Ca sans action alcalinisante.

Tableau 14. Propriétés de différents amendements calciques.

Nom commercial	Formule chimique	Teneur en chaux		Teneurs en éléments annexes	Action
		Teneur (%)	Effet neutralisant ¹ (référence pour l'effet chaulant, exprimé en équivalents CaO, %)		
Chaux Calcaire moulu Carbonate de calcium	CaCO ₃	> 90	50		lente
Chaux d'algues marines	CaCO ₃ MgCO ₃	75–80 10	50	2–3 % Mg	lente
Dolomie	CaCO ₃ MgCO ₃	50–60 40	45–50	12 % Mg	lente
Chaux éteinte	Ca(OH) ₂		55		rapide
Chaux vive	CaO	75–90	75–90		rapide
Chaux vive-chaux magnésienne	CaO MgO	60 25	95	15 % Mg	rapide
Chaux d'Aarberg (écumes de sucrerie) ²	CaCO ₃	54	30	30 % H ₂ O; 1,1 % P ₂ O ₅ ; 0,6 % Mg; 0,3 % N	moyenne
Engrais calcique, sous-produit de l'extraction de gravier	CaCO ₃	Variable selon provenance et charge		Teneur en éléments nutritifs faible	lente

¹ Valeur neutralisante déterminée par calcul = Teneur en % x (CaCO₃ x 0,56 + MgCO₃ x 0,67 + CaO x 1,0 + MgO x 1,39).

² Sous-produit de la transformation de la betterave sucrière, considéré comme engrais de recyclage.

peut arriver que la disponibilité de certains microéléments soit réduite. Dans de tels cas, on peut appliquer du bore (B), du manganèse (Mn) ou d'autres microéléments sous forme minérale dans le sol ou en application foliaire.

La fertilisation foliaire est généralement le moyen le plus sûr d'apporter les microéléments, car une partie des éléments pénètre directement dans les feuilles, sans risquer d'être bloqués dans le sol. La fertilisation foliaire permet de résoudre rapidement des problèmes de carence.

D'autres informations sur les microéléments en fertilisation et en application foliaire se trouvent dans les modules 2 et 3.

4.2.6 Amendements calciques

Les amendements calciques ne sont pas destinés à apporter des éléments nutritifs, mais prioritairement à corriger le pH du sol et à améliorer la structure de celui-ci. La disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes en est indirectement influencée.

Les amendements calciques se différencient les uns des autres par la forme de la liaison chimique du Ca, celle-ci influençant directement leur rapidité d'action (tableau 14). La chaux éteinte et la chaux vive agissent rapidement, tandis que les produits à base de carbonate de magnésium ou de Ca agissent plus lentement. Les amendements calciques sont utilisés avant tout si l'on désire une augmentation rapide du pH du sol, auquel cas il s'agit de prendre en compte la tolérance des cultures à la chaux. Les chaux carbonatées agissant lentement conviennent particulièrement à du chaulage d'entretien. En plus de leur composition, la finesse de mouture des amendements calcaires influence leur efficacité. Une mouture fine augmente la surface des particules, ce qui améliore l'efficacité de l'amendement et sa vitesse d'action.

4.2.7 Liste des engrais

Une liste des engrais disponibles dans le commerce, avec leur teneur en éléments nutritifs, se trouve dans les fiches techniques d'Agridea (2016). La liste actuelle peut être téléchargée à partir du lien <http://www.agridea.ch/fr/publications/publications/production-vegetale/fumure/liste-des-engrais-pour-les-grandes-cultures/>.

La liste des engrais admis en culture biologique se trouve dans la liste des Intrants pour l'agriculture biologique en Suisse de l'Institut de recherche en agriculture biologique (FiBL 2017).

Ces deux listes sont susceptibles d'être complétées par de nouveaux engrais autorisés à la commercialisation en Suisse.

4.3 Effet des engrais minéraux sur le sol

Les engrais peuvent influencer le pH du sol (tableau 15; Sluijsmans 1970). Il faut veiller à l'effet acidifiant en cas d'utilisation régulière d'engrais contenant du SO_4^{2-} ou du NH_4^+ .

En plus de l'effet des engrais et de leurs composants sur le pH du sol, un grand nombre de processus biotiques et abiotiques peuvent aussi être modifiés. Pour des détails sur cette thématique, voir p. ex. Gisi *et al.* (1990).

Tableau 15. Influence de divers engrais sur le pH du sol.

Action acidifiante (pH en baisse)	Action neutre ou alcalinisante (pH stable ou en augmentation)
Engrais à base de sulfates	Cyanamide calcique
Engrais ammoniacaux	Scories Thomas, scories Thomas calciques
Urée	
Superphosphate, superphosphate triple	Hyperphosphate (phosphate naturel tendre)
Lisier/purin de bovin	Lisier de porc
	Engrais calciques (tableau 14)

L'utilisation répétée d'engrais non appropriés peut, à long terme, engendrer des effets indésirables, notamment l'accumulation de substances polluantes, des métaux lourds notamment (module 7).

5. Bibliographie

- Abächerli F., Baier U., Berner F., Bosshard C., Fuchs J., Galli U., Gfeller H., Leuenberger R., Mayer J., Pfaffen P., Schleiss K. & Wellinger A., 2010. Directive suisse 2010 de la branche sur la qualité du compost et du digestat. Avec recommandations d'utilisation pour digestat liquide, digestat solide et compost. Commission de l'inspection de la branche suisse du compostage et de la méthanisation. 40 p.
- ADCF, 1999. Additifs pour les purins et lisiers. Fiche technique ADCF D5. Association pour le développement de la culture fourragère ADCF, Nyon.
- Agridea, 2016. Fiches techniques grandes cultures. Agridea, Lindau.
- Agridea & OFAG, 2013. Instructions concernant la prise en compte des produits issus de la méthanisation dans le Suisse-Bilanz. Module complémentaire 8 du Suisse-Bilanz. Version 1.1, Septembre 2013. Agridea, Lindau, et Office fédéral de l'agriculture OFAG, Berne. 12 p.
- Agridea & OFAG, 2016. Weisungen zur Berücksichtigung von nährstoffreduziertem Futter in der Suisse-Bilanz. Auflage 1.8. Agridea, Lindau, und Bundesamt für Landwirtschaft, Bern. Accès: <https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/instrumente/direktzahlungen/oekologischer-leistungsnachweis/ausgeglicheneduengebilanz.html> [28. 2. 2017].
- Agroscope, 2015. Apports alimentaires recommandés pour les ruminants (Livre vert). Accès: <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/services/soutien/aliments-pour-animaux/apports-alimentaires-recommandes-pour-les-ruminants%20.html> [02. 10. 2015].
- Agroscope, 2016. Apports alimentaires recommandés pour les porcs (livre jaune). Accès: <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/services/soutien/aliments-pour-animaux/apports-alimentaires-recommandes-pour-les-porcs.html> [02. 10. 2016].
- Agroscope, 2017. Valeurs nutritives de référence des fourrages. Accès: www.agroscope.admin.ch
- BDU, 2004. Hofdünger – gezielt eingesetzt. Beratergruppe «Boden Düngung Umwelt» BDU, AGRIDEA, Lindau. 4 p.
- Bosshard C., Flisch R., Mayer J., Basler S., Hersener J.-L., Meier U. & Richner W., 2010. Traitements pour améliorer l'efficacité de l'azote du lisier. Recherche Agronomique Suisse 1 (10), 378–383.

- FiBL, 2017. Liste des intrants 2017. Intrants pour l'agriculture biologique en Suisse. Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, Frick. 132 p. Accès: <https://shop.fibl.org/chfr/1078-intrants.html> [22.12. 2016].
- Gisi U., Schenker R., Schulin R., Stadelmann F. X. & Sticher H., 1990. Bodenökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York. 304 p.
- IBK Arbeitsgruppe Landwirtschaft und Umweltschutz, 2009. Güllebehandlung und Güllezusätze – Empfehlungen für die Landwirtschaft. Arbeitsgruppe Landwirtschaft und Umweltschutz der Kommission Umwelt, Internationale Bodenseekonferenz, Kempten. 29 p.
- Möller K. & Müller T., 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engin. Life Sci.* 12, 242–257.
- OFEV & OFAG, 2011. Constructions rurales et protection de l'environnement. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. L'environnement pratique No. UV-1101-F. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. 122 p.
- Sinaj S. & Richner W., 2017. Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF). *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6), publication spéciale, 276 p.
- Sluijsmans C.M.J., 1970. Der Einfluss von Düngemitteln auf den Kalkzustand des Bodens. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 126, 97–103.
- Webb J., Sørensen P., Velthof G., Amon B., Pinto M., Rodhe L., Salomon E., Hutchings N., Burczyk P. & Reid J., 2013. An assessment of the variation of manure nitrogen efficiency throughout Europe and an appraisal of means to increase manure-N efficiency. *Adv. Agron.* 119, 371–442.

6. Liste des tableaux

Tableau 1. Teneurs en éléments nutritifs des corps d'animaux, du lait et des œufs.	4/4
Tableau 2. Valeurs indicatives des quantités d'éléments nutritifs dans les fèces et l'urine de différents animaux de rente.	4/4
Tableau 3. Notes se rapportant au tableau 2 avec les données pour une attribution correcte des catégories ou pour des corrections spécifiques à des exploitations qui sont importantes pour le calcul des flux d'éléments nutritifs.	4/5
Tableau 4. Quantités indicatives d'engrais de ferme produits par différentes espèces d'animaux de rente dans différents systèmes de stabulation.....	4/6
Tableau 5. Valeurs indicatives pour déterminer les quantités d'eaux usées qui s'écoulent dans la fosse à purin.	4/8
Tableau 6. Teneurs indicatives en matière sèche (MS), en matière organique (MO) et en éléments nutritifs des engrais de ferme pour différentes espèces d'animaux de rente en stabulation.....	4/9
Tableau 7. Proportion de N_{disp} à moyen terme et durant l'année de l'épandage dans différents engrais de ferme.	4/10
Tableau 8. Teneurs moyennes (valeurs médianes) en matière sèche (MS), en matière organique (MO) et en éléments nutritifs dans les engrais de recyclage issus d'installations de méthanisation industrielles.	4/14
Tableau 9. Propriétés des engrais et des formes d'azote.	4/15
Tableau 10. Propriétés des différentes formes de phosphore et d'engrais phosphatés.	4/15
Tableau 11. Propriétés des différentes formes de potassium et d'engrais potassiques.	4/16
Tableau 12. Propriétés de différentes formes de Mg, S et Ca et de différents engrais à base de ces éléments nutritifs.	4/16
Tableau 13. Teneurs en soufre et autres éléments nutritifs des principaux engrais minéraux.	4/17
Tableau 14. Propriétés de différents amendements calciques.	4/17
Tableau 15. Influence de divers engrais sur le pH du sol.	4/18

7. Liste des figures

Figure 1. Une valorisation des éléments nutritifs contenus dans les excréments des animaux qui soit à la fois conforme aux besoins de plantes et ménage l'environnement est un défi pour les exploitations avec bétail.	4/3
Figure 2. En cas d'absence temporaire de l'étable, les quantités d'engrais de ferme doivent être réduites en fonction des jours d'absence des vaches.....	4/7
Figure 3. Représentation schématique des possibilités d'épandage du lisier/purin en fonction du développement des cultures et des risques pour l'environnement.	4/11
Figure 4. La condition préalable pour pouvoir épandre les engrais de ferme au moment optimal, sans être contraint de les évacuer en dehors de la période de végétation, consiste à disposer d'une capacité de stockage suffisante.	4/12
Figure 5. Classification des produits de méthanisation en engrais de ferme ou en engrais de recyclage.	4/13

8. Liste des annexes

Annexe 1. Définitions de termes et d'abréviations dans le domaine des engrais.....	4/21
Annexe 2. Ajouts aux notes du tableau 2 en complément du tableau 3, avec des remarques générales et des données sur les conditions de production qui ont été à la base des calculs de déjections.	4/22
Annexe 3. Valeurs indicatives pour les éléments nutritifs contenus dans les déjections (fèces et urines) d'autres catégories d'animaux (si rien d'autre n'est mentionné, en kg par place et par an).....	4/23

9. Annexes

Annexe 1. Définitions de termes et d'abréviations dans le domaine des engrais.

Extrait des annexes 2 et 3, module 17

Abréviation/ terme technique	Description usuelle/ explications
Azote disponible (N_{disp})	Part du N total ou teneur en N des résidus de récolte, des engrais de ferme, des engrais de recyclages et des engrais verts, disponible pour la plante à court et moyen terme, lorsque le mode d'exploitation est optimal. Cette valeur n'est pas identique au N utilisable par les plantes, car une partie du N organique est aussi disponible en dehors de la phase de la formation du rendement. Le N disponible en dehors de la phase de formation du rendement peut engendrer une augmentation de la teneur en N des produits principaux ou secondaires désirée (ex: céréales) ou non désirée (ex: betterave sucrière, légumes à feuilles) ou une augmentation du lessivage des nitrates, plus particulièrement en grandes cultures et en culture maraîchère de plain champs.
Coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU)	Fraction du N total d'un engrais (minéral ou organique) qui est absorbée par la culture jusqu'à la récolte. CAU se calcule à partir d'essais comparant les quantités d'azote absorbées par la culture dans un traitement fertilisé ($N_{absFert}$) et dans un témoin non-fertilisé (N_{absTem}): $CAU (\%) = (N_{absFert} - N_{absTem})/X \cdot 100$ où X = dose de N apportée dans le traitement fertilisé.
Compost de fumier	Fumier stocké pendant plus de six mois et brassé plusieurs fois. La structure de la paille ou d'autres litières n'est plus visible. Teinte brun foncé. Matériel de base: fumier frais ou fumier de stabulation libre produit par des bovins, fumier d'autres espèces animales.
Crottes de poules	Contient la totalité des déjections des volailles collectées dans les poulaillers avec tapis à crottes
Efficacité du N	Effets du N des engrais de ferme et des engrais de recyclage sur le rendement et la qualité des plantes. La valeur est exprimée en pour-cent de l'effet obtenu par une même quantité de N contenu dans un engrais minéral de référence, en général le nitrate d'ammoniaque. Avec les cultures dont la période de croissance ne couvre pas la totalité de la saison (p. ex. céréales, pommes de terre) ainsi qu'en cas de mauvaise gestion des engrais de ferme, l'effet apparent du N des engrais de ferme est souvent plus faible. En revanche, les pertes sont plus élevées.
Fumier au tas	Fumier stocké pendant au moins trois mois sur une place en dur à l'extérieur de l'étable et sans traitement particulier. La structure de la litière est encore bien visible. Teinte brun foncé à verdâtre. Matériel de base: fumier frais de bovins.
Fumier composté	Fumier qui a été stocké pendant plus de trois mois et brassé au moins une fois. La structure de la litière est à peine visible. Couleur brune. Matériel de base: fumier frais ou fumier de stabulation libre provenant de l'élevage de bovins ainsi que fumier d'autres espèces d'animaux.
Fumier de poules, de poulets ou de dindes	Contient la totalité des déjections des volailles ainsi que la litière
Fumier de stabulation libre	Fumier de stabulation libre à litière profonde. Contient la totalité des fèces et des urines ainsi que de la litière
Fumier de veau, porc, cheval, mouton et chèvre	Fumier qui a été stocké plus de trois mois sur une place en dur en dehors de l'étable et sans manutention particulière. La structure de la paille ou d'autres litières est encore parfaitement visible. Contient en plus de la litière, la totalité des fèces et une part variable des urines produites.
Fumier frais	Fumier stocké pendant moins d'un mois
Lisier, lisier de porc	Contient la totalité des déjections animales plus éventuellement de la litière (paille hachée, sciure, copeaux, etc.).
MF	Matière fraîche
MO	Matière organique
MS	Matière sèche
NH_3	Ammoniac
NH_4^+	Ammonium
NO_3^-	Nitrate
N_{sol}	Formes de N solubles à l'eau (ammonium, urée, etc.) dans les déjections des animaux de rentes et dans les engrais de ferme
N_{tot}	Azote total (indépendamment de sa forme)
Purin	Contient une forte proportion d'urine et une proportion variable de fèces (selon système de stabulation et quantité de litière)
UGB	Unité gros bétail
Valeurs indicatives des teneurs en éléments nutritifs dans les engrais de ferme	La plupart des valeurs ont été établies à partir de plans d'affouragement (selon l'espèce animale, avec plusieurs rations). Il a aussi été tiré parti d'analyses d'engrais de ferme dans des exploitations de la pratique. Dans des cas particuliers, selon l'affouragement et le système de stabulation, d'importantes différences peuvent survenir.

Annexe 2. Ajouts aux notes du tableau 2 en complément du tableau 3, avec des remarques générales et des données sur les conditions de production qui ont été à la base des calculs de déjections.

Notes du tableau 2	Critères résumés	Description de la production
A1	Bovin d'élevage	Correspond à une vache laitière selon la note 1 du tableau 3. Les données sont valables pour une vache primipare de 27 à 30 mois. Pour un âge de mise bas de 24 mois, la consommation de fourrage de base est de 17 dt la première année avec une déjection de 30 kg N, 4,5 kg P, 36 kg K, 4 kg Mg, 12 kg Ca: en seconde année, ce sont 30 dt et une déjection de 45 kg N, 6,5 kg P, 54 kg K, 6 kg Mg, 18 kg Ca. Les veaux vendus entre 3 et 6 semaines ne sont pas pris en compte.
A2	Veau à l'engrais	Engraissement de 60 à environ 220 kg, avec un accroissement journalier de 1'400 g; environ 3,3 rotations par place de veau (selon la banque de données sur le trafic des animaux).
A3	Veau de vache allaitante	Veau élevé jusqu'à un poids final d'environ 350 kg (Natura-Beef) ou environ 220 kg (Natura-Veal); une seule rotation par année est possible.
A4	Engraissement de bovins (intensif)	Engraissement intensif d'environ 65 à 530 kg avec un accroissement journalier de 1'400 g (taurillons). Si les animaux sont placés en stabulation seulement après le sevrage, on peut calculer avec les valeurs se rapportant à des animaux âgés de plus de 160 jours durant toute la période d'engraissement. Pour les veaux en pré-engraissement, on peut utiliser les mêmes valeurs que pour les veaux d'engraissement.
A5	Bovins engraisés au pâturage	Engraissement au pâturage avec une ou deux périodes de pâture (environ 17 ou 22 mois), de la naissance à environ 530 kg.
A6	Jument avec poulain jusqu'à 6 mois	Le poulain né au printemps reste avec sa mère jusqu'à l'automne. S'il reste plus longtemps sur l'exploitation, il doit être pris en compte séparément. Le surplus de besoins en fourrages de la jument par rapport à un cheval de selle ou de trait est généralement couvert par des concentrés, sans augmentation de la ration en fourrage de base. Si le concentré se limite à de l'avoine (maximum 700 kg par année), la consommation de fourrage de base augmente de 5 dt.
A7	Autre cheval de plus de 3 ans	C'est un cheval adulte d'environ 550 kg. Pour des animaux plus légers comme des poneys, ânes ou de jeunes animaux, etc., les déjections peuvent être extrapolées en fonction du poids. Les données sont valables pour une faible charge de travail (une heure par jour de selle ou de trait). Pour une plus forte sollicitation, les quantités de N et de P dans les déjections augmentent de 7 % par heure d'activité physique, et de 4 % pour les autres éléments nutritifs.
A8	Place mouton	Brebis y compris les animaux d'élevage pour la remonte finition d'engraissement des autres jeunes animaux, part du bélier incluse. Les données se rapportent à une production relativement intensive avec du fourrage de prairie semblable à celui qui est destiné aux brebis laitières. Pour un élevage extensif, avec un fourrage à un stade d'utilisation avancé, la déjection est de 12 kg N, 2 kg P (4,6 kg P ₂ O ₅), 17 kg K (20 kg K ₂ O), 2 kg Mg et 7 kg Ca pour une consommation de fourrage de base de 8 dt par an.
A9	Place de porc à l'engrais	Une place de porc à l'engrais (PPE) correspond à une place d'engraissement de 26 à 108 kg avec un accroissement moyen de 800 à 850 g/jour et 7 jours de vide sanitaire entre les rotations (environ 3,3 rotations par année).
A10	Truie d'élevage	Une place de truie d'élevage (PTE) est occupée par une truie incluant 24 à 28 porcelets par année jusqu'à un poids de 25 à 30 kg. Les animaux destinés à la remonte sont considérés comme des porcs à l'engrais. Vide sanitaire: 0 jour par place de truie d'élevage et 3 jours pour les truies allaitantes, les truies portantes et les porcelets.
A11	Poule pondeuse	Durée de rotation d'environ un an. Sans influence sur les déjections.
A12	Poulette	Les poussins atteignent 1,3 à 1,6 kg en 18 semaines; 2 à 2,5 rotations par an.
A13	Poulet à l'engrais	Les quantités excrétées sont calculées pour 100 places normales (poids final d'au moins 2 kg) pour un taux d'occupation normal du poulailler (max. 30 kg/m ²) et alimentation sans sorties temporaires. Pour les races intensives, cela correspond à une durée d'engraissement d'à peine 40 jours. Contrairement aux autres animaux, les déjections des poulets d'engraissement sont calculées par place et non par animal engraisé, car le poids final des animaux ainsi que la durée des rotations sont très variables.

Annexe 3. Valeurs indicatives pour les éléments nutritifs contenus dans les déjections (fèces et urines) d'autres catégories d'animaux (si rien d'autre n'est mentionné: en kg par place et par an).

Type d'animal/type de production	Éléments nutritifs dans les déjections en kg par unité (animal ou place d'animal) et par an						Consommation de fourrage de base (dt MS/an)
	N	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O	Mg	
Mulet, bardot de tout âge	25	5,7	13	35,7	43	9,0	17
Ane, poney, petits chevaux (de tout âge)	16	3,5	8,0	22,4	27	1,8	10
Agneau/cabri engraisés au pâturage	2,1	0,3	0,8	2,9	3,5	0,3	0,40
Bison, plus de 3 ans	60	13,1	30	91,3	110	6,0	39
Bison, moins de 3 ans	20	4,4	10	37,3	45	2,5	18
Daim ¹	20	3,1	7,0	24,1	29	2,4	10
Cerf	40	6,1	14	48,1	58	4,8	20
Wapiti	80	12,2	28	96,3	116	9,6	40
Lama, plus de 3 ans	17	2,8	6,5	23,2	28	1,7	8,5
Lama, moins de 3 ans	11	1,7	4,0	12,4	15	1,0	4,9
Alpaga, plus de 3 ans	11	1,7	4,0	14,9	18	1,0	5,5
Alpaga, moins de 3 ans	7,0	1,1	2,5	7,5	9,0	0,5	3,0
Lapin: lapereau inclus jusqu'à 35 jours	2,6	0,7	1,5	2,1	2,5	–	0,36
Lapin: lapereau à partir de 35 jours (100 places)	79	21,0	48	62,2	75	–	4,0
Autruche, plus de 13 mois	24	4,4	10	12,4	15	1,3	11
Autruche, moins de 13 mois	11	2,6	6,0	6,6	8,0	0,8	2,0
Canard (100 places)	66	14,8	34	19,9	24	5,0	–
Oie (100 places)	105	23,1	53	24,9	30	14	–
Pintade (100 places)	38	8,3	19	11,6	14	3,0	–
Caille (100 places)	30	7,9	18	5,4	6,5	–	–

¹ Mère plus petits jusqu'à 16 mois; une unité = deux animaux le jour du recensement.

