



9/ Fertilisation des herbages

Olivier Huguenin-Elie¹, Eric Mosimann², Patrick Schlegel³,
Andreas Lüscher¹, Willy Kessler¹ et Bernard Jeangros²

¹ Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

² Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

³ Agroscope, 1725 Posieux, Suisse

Renseignements: olivier.huguenin@agroscope.admin.ch

Table des matières

1. Introduction	9/3
2. Principes de bases	9/3
3. Rendements des prairies et des pâturages	9/3
4. Teneurs en macro-éléments des herbages	9/5
5. Prélèvements en éléments nutritifs	9/7
6. Recommandations de fertilisation	9/7
6.1 Fertilisation azotée	9/7
6.2 Fertilisation phosphatée	9/13
6.3 Fertilisation potassique	9/13
6.4 Fertilisation magnésienne	9/14
6.5 Fertilisation soufrée	9/14
7. Diagnostic basé sur la teneur en éléments nutritifs dans le fourrage	9/14
8. Engrais de ferme	9/15
9. Restitutions au pâturage	9/15
10. Entretien calcique du sol	9/16
11. Bibliographie	9/17
12. Liste des tableaux	9/20
13. Liste des figures	9/20
14. Annexe	9/21

1. Introduction

Les prairies et les pâturages sont des communautés végétales formées de nombreuses espèces de valeur agronomique et écologique contrastée. La fertilisation des herbages se différencie de celle des autres cultures par le fait qu'elle doit être intégrée dans une stratégie de maintien à long terme de l'équilibre botanique souhaité. Elle a pour but de contribuer au maintien d'une végétation adaptée au milieu ainsi qu'aux objectifs de l'exploitant/e en assurant un fourrage de bonne qualité et un rendement approprié. La fertilisation influence la qualité du fourrage récolté sur les herbages principalement par l'influence qu'elle exerce sur la composition botanique. De plus, à la différence de la plupart des autres cultures, la qualité du produit récolté concerne les feuilles et les tiges des plantes. Dans ce module, le mot «herbage» se rapporte au système sol-plantes d'une prairie ou d'un pâturage, et le fourrage produit par les herbages est simplement dénommé «fourrage».

2. Principes de bases

- La fertilisation des prairies et des pâturages tient compte non seulement des prélèvements par les plantes et du niveau de fertilité du sol, mais aussi de la composition botanique, c'est-à-dire des besoins du type de végétation que l'on souhaite favoriser. Une prairie permanente constituée de 50 à 70 % de graminées, de 10 à 30 % de légumineuses et de 10 à 30 % d'autres plantes permet dans la plupart des cas d'obtenir un fourrage abondant et de bonne qualité. Les diverses espèces qui se développent dans une prairie ont des exigences différentes en nutriments.
- Pour favoriser et maintenir une bonne composition botanique, stable à long terme, et éviter le développement excessif d'espèces indésirables, le niveau de fertilisation doit impérativement être adapté à l'intensité d'utilisation (figure 1) et tenir compte des conditions naturelles. Lorsque les conditions naturelles sont peu favorables aux bonnes plantes fourragères (climat rude, exposition nord, sol lourd ou superficiel, parcelle peu ensoleillée, etc.), une exploitation intensive est déconseillée. Lorsque celles-ci sont bonnes, l'exploitant/e peut choisir l'une ou l'autre des quatre intensités d'exploitation. Des sols riches en éléments nutritifs ne permettent cependant pas le développement de prairies extensives riches en espèces.

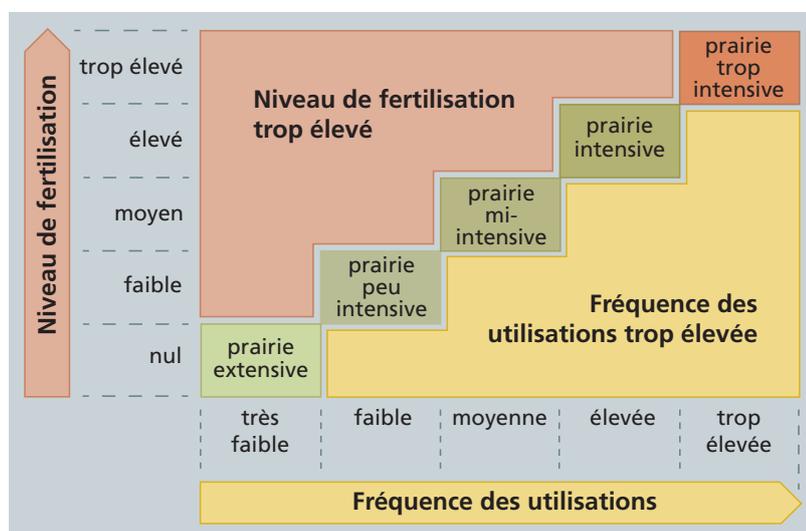


Figure 1. Types de prairies selon la fréquence des utilisations et le niveau de fertilisation correspondant (en particulier la fertilisation azotée).

- Les engrais de ferme constituent la source la plus importante d'éléments nutritifs dans les exploitations herbagères. La gestion raisonnée de la fertilisation passe donc par l'utilisation optimale des engrais de ferme à l'échelle de l'exploitation. En principe, les besoins des herbages sont en grande partie voire totalement couverts par l'épandage des engrais de ferme qui contiennent la majeure partie des éléments nutritifs exportés par la récolte des fourrages.
- Les rendements en matière sèche (MS) des herbages ne sont en général pas mesurés et donc rarement connus directement. Les valeurs prévisionnelles retenues pour le calcul du plan de fertilisation des herbages doivent donc être vérifiées en les confrontant à la consommation estimée en fourrage des animaux.
- Les erreurs commises dans l'utilisation et la fertilisation d'une prairie ou d'un pâturage ne sont généralement pas perceptibles immédiatement. Inversement, améliorer une prairie ou un pâturage permanent dégradé est toujours difficile et nécessite plusieurs années.

3. Rendements des prairies et des pâturages

Les rendements des herbages sont influencés par la composition botanique de la communauté végétale (p. ex. Nyfeler *et al.* 2009; Husse *et al.* 2016), par les conditions climatiques, ainsi que par les caractéristiques du sol (Mosimann 2005). Les rendements diminuent en général avec l'altitude (durée de végétation plus courte); pour les herbages fertilisés, cette diminution se situe entre 3 et 6 décitonnes (dt) de MS par 100 m d'altitude en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation ainsi que des conditions pédoclimatiques (Dietl 1986). Les équations reportées dans le tableau 1a servent au calcul de la moyenne indicative de rendement pour l'altitude concernée. Le tableau 1b donne pour exemples les moyennes indicatives pour quelques altitudes. Les données disponibles montrent qu'en dessous de 500 m d'altitude, le rendement ne varie pas significativement avec l'altitude pour les régions suisses; le rendement estimé est donc équivalent à celui calculé pour une altitude de 500 m. Les herbages couvrant des surfaces agricoles extrêmement hétérogènes du point de vue pédoclimatique, le potentiel de rendement de ceux-ci varie en conséquence très largement, même à l'intérieur d'une zone altitudinale déterminée. C'est la raison pour laquelle le tableau 1b

indique un large intervalle de rendements pour une même altitude ($\pm 15\%$). L'amplitude de cet intervalle correspond à l'intervalle de prédiction de 75 % pour les régressions calculées avec le jeu de données disponibles. Lorsque les conditions sont particulièrement favorables à la croissance des herbages, il est possible d'obtenir un rendement supérieur à la moyenne indiquée, en particulier avec certaines prairies temporaires (valeurs supérieures des intervalles). Au contraire, lorsque l'ensoleillement est insuffisant (exposition nord, lisière de forêt) ou lorsque les plantes souffrent périodiquement d'un manque ou d'un excès d'eau (sol superficiel et léger, sol lourd et compacté, précipitations trop faibles ou trop importantes; Mosimann *et al.* 2013; Hoekstra *et al.* 2014), le rendement diminue (valeurs inférieures des intervalles). Dans le Jura par exemple, où le climat est plus rude que dans les Préalpes et les Alpes pour une même altitude (p. ex. Lauber *et al.* 2012), les rendements correspondent plutôt aux valeurs inférieures des intervalles indiqués dans le tableau 1b.

Il est également important de ne pas surestimer le rendement des parcelles en surestimant l'intensité d'utilisation, ceci particulièrement en altitude, où les situations permettant une utilisation intensive des herbages sont moins fréquentes qu'en plaine. La variation interannuelle est elle aussi importante. Par exemple, le coefficient de variation du rendement annuel était de 17 % autour de la moyenne durant les 30 ans de suivi du rendement d'une prairie à faner fertilisée du Jura, et de 18 % autour de la moyenne et durant les 24 ans de suivi du rendement d'une prairie des Alpes centrales (voir aussi Mosimann *et al.* 2012).

La disponibilité en eau a un effet marqué sur le rendement. La diminution de rendement provoquée par une sécheresse est de l'ordre de 5 à 15 dt MS/ha par 100 mm de déficit pluviométrique (Lazzarotto *et al.* 2010; Meisser *et al.* 2013; Mosimann *et al.* 2013). Lorsque la sécheresse est plus sévère dans les zones de basse altitude qu'en montagne, la relation entre altitude et rendement peut ainsi être effacée voir inversée. Ceci est observé régulièrement avec les parcelles d'essai d'Agroscope dans la région de Changins. Le rendement des prairies temporaires est d'environ 10 % supérieur lors de la première année principale d'utilisation par rapport aux années suivantes (Lehmann *et al.* 2001).

Les rendements des tableaux 1a et 1b ne sont donc que des valeurs indicatives correspondant aux rendements pour des situations moyennes dans les zones considérées. Il est dès lors impératif d'ajuster les niveaux de rendements à l'échelle de l'exploitation en se basant sur le bilan fourrage calculé sur plusieurs années (quantité estimée de fourrage ingérée par les animaux, moyennant correction des quantités de fourrages non issus d'herbages ainsi que des fourrages vendus et achetés).

Les rendements des pâturages indiqués dans les tableaux 1a et 1b sont inférieurs à ceux des prairies pour une altitude et une intensité d'utilisation correspondante, car la pâture occasionne généralement des pertes au champ plus importantes que la récolte du fourrage. Une conduite op-

Tableau 1a. Relation entre l'altitude (m) et le potentiel moyen de rendement (dt MS/ha) en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation.

Le niveau d'incertitude autour de la moyenne indiquée est élevé. En dessous de 500 m d'altitude, l'estimation du rendement correspond à la valeur calculée pour une altitude de 500 m.

Mode et intensité d'utilisation	Rendement annuel moyen (dt MS/ha) ¹
Prairie	
Intensive	159 – 0,058 x altitude
Mi-intensive	121 – 0,046 x altitude
Peu-intensive	80 – 0,032 x altitude
Extensive	38 – 0,015 x altitude
Pâturage	
Intensif	133 – 0,046 x altitude
Mi-intensif	101 – 0,038 x altitude
Peu-intensif	65 – 0,026 x altitude
Extensif	30 – 0,012 x altitude

¹ Il s'agit du rendement récolté ou ingéré par les animaux au pâturage; les pertes au champ sont prises en compte, mais pas les pertes de conservation (silo, séchoir ou tas).

timale de la pâture réduit cette différence. Pour un pâturage donné, le rendement ingéré peut être estimé de la façon suivante :

$$Rdt_{ingéré} = \frac{Charge\ instant. \times Durée\ pâture \times Ingestion\ jour.}{100}$$

où:

- *Rdt ingéré* est le rendement ingéré en dt MS/ha.
- *Charge instant.* est la charge instantanée sur le pâturage en nombre d'animaux par hectare. La charge instantanée est égale au nombre d'animaux par hectare qui pâturent en même temps sur le pâturage.
- *Durée pâture* est la durée de pâture exprimée en jours. Elle équivaut au nombre total de jours de présence des animaux sur la surface en question au cours d'une année.
- *Ingestion jour.* est l'ingestion journalière moyenne de fourrage au pâturage de la catégorie d'animal concernée en kg MS/animal/jour. L'ingestion journalière moyenne au pâturage varie selon la catégorie d'animal, la quantité de fourrage disponible sur le pâturage, l'importance de la complémentation d'autres fourrages et aliments, et le niveau de production des animaux. Les équations permettant d'estimer la capacité d'ingestion totale des bovins, ovins et caprins sont données, en fonction du niveau de production, dans l'ouvrage «Apports alimentaires recommandés pour les ruminants» (Livre vert, Agroscope 2015a). Sur une base annuelle, les quantités de référence de fourrage consommé sont indiquées dans le tableau 2 du module 4 «Propriétés et utilisation des engrais» pour l'ensemble des catégories d'animaux.

Tableau 1b. Exemples d'estimations du rendement annuel récolté en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation ainsi que de l'altitude à l'aide des équations indiquées dans le tableau 1a.

Mode et intensité d'utilisation Nombre d'utilisations par année ¹	Altitude (m)	Rendement annuel récolté (dt MS/ha)	
		Moyenne indicative	Intervalle ²
Prairie intensive			
5–6 utilisations	≤ 500	130	111–150
5 utilisations	700	119	101–137
4 utilisations	900	107	91–123
3–4 utilisations ³	1'100	96	81–110
3 utilisations ³	1'300	84	71–97
Prairie mi-intensive			
4–5 utilisations	≤ 500	98	83–112
4 utilisations	700	88	75–102
3 utilisations	900	79	67–91
2–3 utilisations	1'100	70	59–80
2 utilisations	1'300	61	52–70
Prairie peu intensive			
3 utilisations	≤ 500	64	54–74
3 utilisations	700	58	49–66
2 utilisations	900	51	44–59
1–2 utilisations	1'100	45	38–52
1–2 utilisations	1'300	38	33–44
Pâturage intensif (> 3 UGB/ha/saison de pâture)⁴			
6–8 rotations	≤ 500	110	94–127
6–7 rotations	700	101	86–116
5–6 rotations	900	92	78–105
5 rotations ³	1'100	82	70–95
4 rotations ³	1'300	73	62–84
Pâturage mi-intensif (2–3 UGB/ha/saison de pâture)⁴			
5–6 rotations	≤ 500	82	70–95
5 rotations	700	75	63–86
4–5 rotations	900	67	57–77
4 rotations	1'100	59	50–68
3 rotations	1'300	52	44–60
Pâturage peu intensif (1–2 UGB/ha/saison de pâture)⁴			
2–4 rotations	≤ 500	52	44–60
2–4 rotations	700	47	40–54
2–3 rotations	900	42	35–48
1–3 rotations	1'100	36	31–42
1–2 rotations	1'300	31	27–36

¹ La dernière pâture en automne compte comme utilisation uniquement si le rendement est non négligeable (rendement ingéré > 10 dt MS/ha).

² Intervalles indiquant la forte variabilité de rendement pour une altitude donnée, provenant de la variabilité entre sites ainsi que de la variabilité interannuelle ($\pm 15\%$).

³ En altitude, les situations permettant une utilisation intensive des herbages sont moins fréquentes qu'en plaine et une utilisation mi-intensive est souvent plus appropriée.

⁴ Le nombre d'unités gros bétail (UGB) par hectare et par saison de pâture permet d'évaluer l'intensité d'exploitation moyenne sur l'ensemble de la surface pâturée lorsqu'il n'y a pas ou que très peu d'affouragement complémentaire à la crèche.

4. Teneurs en macro-éléments des herbages

Les teneurs en macro-éléments [azote (N), phosphore (P), potassium (K), magnésium (Mg) et soufre (S)] dans les fourrages provenant d'herbages sont fonction de la composition botanique, du stade de développement de la végétation et du cycle d'utilisation. Les teneurs en macro-éléments d'un fourrage jeune sont supérieures à celles d'un fourrage récolté tardivement (Daccord *et al.* 2001; Wyss et Kessler 2002; Schlegel *et al.* 2016). Les valeurs de référence en fonction de ces facteurs sont disponibles dans la «Base suisse de données des aliments pour animaux» (Agroscope 2015b). Divers documents édités par l'ADCF et Agridea facilitent la reconnaissance des principaux types de prairie et de pâturage ainsi que des stades de développement. Le tableau 2 contient les teneurs de référence en N, P, K, Mg et S sur l'ensemble de la période de végétation. Les teneurs moyennes indiquées dans le tableau 2 ont été pondérées par la part de rendement du 1^{er} cycle de végétation car les teneurs en P, K, Mg et S sont plus basses au 1^{er} cycle qu'aux cycles suivants (Schlegel *et al.* 2016). Ces teneurs sont valables pour des herbages de composition botanique équilibrée (entre 50 et 70 % de graminées; Agroscope 2015a). Par rapport à ces valeurs, un fourrage riche en graminées contient 5 à 10 % de N en moins, un fourrage riche en légumineuses 10 à 25 % en plus et un fourrage riche en autres plantes 10 % en plus. Un fourrage riche en graminées contient 5 à 10 % de P en moins. Les teneurs en P d'une prairie riche en légumineuses ou en autres plantes sont comparables à celles d'une prairie équilibrée. Les teneurs en K sont aussi valables pour une prairie riche en graminées ou en autres plantes. Un fourrage riche en graminées contient 5 à 10 % de Mg en moins, un fourrage riche en autres plantes 20 à 30 % de Mg en plus.

Tableau 2. Teneurs en macro-éléments dans les herbages de composition botanique équilibrée en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation

(selon Agroscope 2015b, en considérant que le stade d'utilisation est retardé lorsque l'intensité d'utilisation diminue).

Mode et intensité d'utilisation	Teneurs en macro-éléments (kg/dt de matière sèche)									
	N		P ¹		K ¹		Mg		S	
	Ø ²	Intervalle ³	Ø ²	Intervalle ³	Ø ²	Intervalle ³	Ø ²	Intervalle ³	Ø ²	Intervalle ³
Prairie										
Intensive	2,5	2,1–2,9	0,36	0,31–0,42	3,0	2,5–3,4	0,19	0,16–0,23	0,19	0,15–0,23
Mi-intensive	2,2	1,8–2,6	0,33	0,28–0,39	2,7	2,3–3,1	0,17	0,14–0,21	0,17	0,13–0,21
Peu-intensive	1,8	1,4–2,2	0,28	0,23–0,34	2,1	1,7–2,6	0,15	0,12–0,19	0,13	0,09–0,17
Extensive	1,4	1,0–1,8	0,23	0,18–0,28	1,4	1,0–1,8	0,14	0,10–0,17	0,11	0,07–0,15
Pâturage										
Intensif	2,9	2,5–3,3	0,39	0,34–0,45	3,1	2,7–3,6	0,21	0,18–0,25	0,22	0,18–0,26
Mi-intensif	2,5	2,1–2,9	0,36	0,31–0,42	2,9	2,5–3,4	0,19	0,15–0,23	0,19	0,15–0,23
Peu-intensif	2,0	1,6–2,4	0,31	0,26–0,37	2,5	2,1–2,9	0,16	0,13–0,20	0,15	0,11–0,19
Extensif	1,6	1,2–2,0	0,27	0,22–0,33	2,0	1,6–2,4	0,15	0,11–0,18	0,13	0,09–0,17

¹ Les teneurs exprimées en P₂O₅ et en K₂O sont indiquées dans l'annexe.² Valeurs moyennes entre le 1^{er} cycle de végétation et les cycles suivants, pondérées par la part de rendement du 1^{er} cycle.³ Intervalles indiquant la fourchette de valeurs fréquemment mesurées.**Tableau 3a. Prélèvements annuels indicatifs et recommandations de fertilisation en kg de N, P, K et Mg par unité de matière sèche produite pour les herbages en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation.**

Ces recommandations de fertilisation sont valables pour les herbages permanents et temporaires de la surface agricole utile.

Mode et intensité d'utilisation	Prélèvements annuels (kg/dt MS)				Recommandations de fertilisation (kg/dt MS)			
	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N ¹	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
Prairie²								
Intensive ³	2,5	0,36 (0,82)	3,0 (3,6)	0,19	1,1–1,3	0,36 (0,82)	2,2 (2,7)	0,25
Mi-intensive ³	2,2	0,33 (0,76)	2,7 (3,3)	0,17	0,8–1,1	0,31 (0,71)	1,9 (2,3)	0,20
Peu intensive	1,8	0,28 (0,64)	2,1 (2,5)	0,15	0,4–0,6	0,25 (0,57)	1,4 (1,7)	0,15
Extensive	1,4	0,23 (0,53)	1,4 (1,7)	0,14	0	0	0	0
Pâturage⁴								
Intensif ^{5,6}	2,9	0,39 (0,89)	3,1 (3,7)	0,21	1,1–1,3	0,24 \ 0,16 (0,55 \ 0,37)	0,93 \ 0,25 (1,12 \ 0,30)	0,20
Mi-intensif ⁵	2,5	0,36 (0,82)	2,9 (3,5)	0,19	0,7–1,0	0,22 \ 0,14 (0,50 \ 0,32)	0,87 \ 0,20 (1,05 \ 0,24)	0,15
Peu intensif	2,0	0,31 (0,71)	2,5 (3,0)	0,16	0	0,17 (0,39)	0,37 (0,45)	0
Extensif	1,6	0,27 (0,62)	2,0 (2,4)	0,15	0	0	0	0

¹ Les apports de N aux prairies et aux pâturages sont effectués à chaque utilisation, conformément aux indications du tableau 7; la recommandation de fertilisation azotée indiquée ici ne s'applique pas aux mélanges à base de luzerne (type L) et de trèfle violet (type M) qui reçoivent nettement moins de N (voir paragraphe «fertilisation azotée»).² En cas de fauche-pâturage, les restitutions par cycle de pâture indiquées dans le tableau 5 doivent être déduites des recommandations de fertilisation pour prairie.³ Pour P, K et Mg, les mélanges à base de luzerne (type L) et de trèfle violet (type M) sont fertilisés selon les recommandations pour prairie intensive, bien que la fréquence des coupes corresponde généralement à une utilisation mi-intensive.⁴ Dans les recommandations de fertilisation pour les pâturages, les restitutions par la pâture sont déjà prises en compte.⁵ Les recommandations de fertilisation P et K pour les pâturages mi-intensifs et intensifs sont indiquées pour une pâture avec détention à l'étable (première valeur) et sans détention à l'étable (seconde valeur). Pour Mg, les mêmes recommandations sont valables dans les deux cas.⁶ Ces recommandations sont aussi valables pour la pâture continue sur gazon court (sans rotation).

5. Prélèvements en éléments nutritifs

Les prélèvements en éléments nutritifs par la récolte ou l'ingestion des fourrages sont calculés en multipliant le rendement en MS par les teneurs en éléments nutritifs dans la biomasse récoltée, indépendamment du compartiment de l'écosystème dans lequel ces éléments nutritifs ont été prélevés. Pour N notamment, les prélèvements indiqués incluent le N d'origine atmosphérique rendu disponible aux plantes par la fixation symbiotique et ne représentent donc pas uniquement de N prélevé du sol. Les prélèvements annuels donnés dans le tableau 3a sont valables pour les valeurs moyennes des teneurs en macro-éléments pour des prairies et pâturages ayant une composition botanique équilibrée. Les prélèvements effectifs peuvent néanmoins varier considérablement. Pour les pâturages, les prélèvements indiqués dans le tableau 3a correspondent à la quantité moyenne d'éléments nutritifs ingérée par les animaux.

6. Recommandations de fertilisation

Le tableau 3a indique les recommandations de fertilisation en N, P, K et Mg pour les prairies et les pâturages selon leur intensité d'utilisation. Les recommandations pour P, K et Mg sont valables pour les sols ayant un niveau de fertilité satisfaisant (classe de fertilité C). Les adaptations du niveau de fertilisation P, K et Mg en fonction des résultats de l'analyse de sol sont effectuées au moyen des facteurs de correction décrits dans le module 2. En tant qu'exemples, le tableau 3b donne les quantités recommandées d'apport en kilogramme par hectare pour les moyennes indicatives de rendement indiquées dans le tableau 1b pour l'altitude correspondante. Si le rendement prévisionnel s'écarte de cette moyenne indicative, la fertilisation doit être calculée à l'aide des recommandations de fertilisation par unité de matière sèche produite (kg/dt MS) indiquées dans le tableau 3a, multipliées par rendement prévisionnel.

La relation entre le prélèvement et la recommandation de fertilisation varie selon l'intensité d'utilisation, afin de maîtriser la composition botanique et la qualité du fourrage (tableau 4; voir les paragraphes relatifs aux différents éléments nutritifs pour les explications). Pour un même rendement, une prairie utilisée fréquemment prélève plus d'éléments nutritifs qu'une prairie utilisée de façon moins intensive. Les teneurs en éléments nutritifs d'un fourrage jeune sont en effet supérieures à celles d'un fourrage récolté tardivement. En conséquence, les recommandations de fertilisation par unité de biomasse récoltée augmentent avec l'intensité d'utilisation. Ainsi, le choix objectif du niveau d'intensité d'utilisation en fonction de la fréquence des utilisations est essentiel au calcul d'une fumure adéquate. Les recommandations de fertilisation du tableau 3a sont identiques pour les herbages permanents et temporaires. Les particularités pour les mélanges à base de luzerne ou de trèfle violet sont décrites dans les notes accompagnant ce tableau. Pour les prairies de fauche occasionnellement pâturées, les restitutions par cycle de pâture indiquées dans le tableau 5

doivent être déduites des recommandations de fertilisation pour prairie.

Dans une prairie ou un pâturage, l'excès de fertilisation provoque le développement d'une flore nitrophile au détriment des autres espèces, en particulier des légumineuses (Jeangros 1993; figure 4a). Les prairies utilisées de manière extensive et constituées d'une communauté végétale correspondante (p. ex. Mesobromion) ne doivent pas être fertilisées. La conservation de la biodiversité floristique est fortement compromise par une fertilité élevée du sol qui augmente la dominance de quelques espèces productives (Humbert *et al.* 2015).

Davantage d'informations concernant les recommandations de fertilisation sont données dans les paragraphes relatifs aux différents éléments nutritifs. Les recommandations de fertilisation pour les mélanges graminées-légumineuses en culture dérobée, les semis d'août de prairies temporaires, ainsi que pour la production de semences de graminées et de légumineuses fourragères sont données dans le tableau 6.

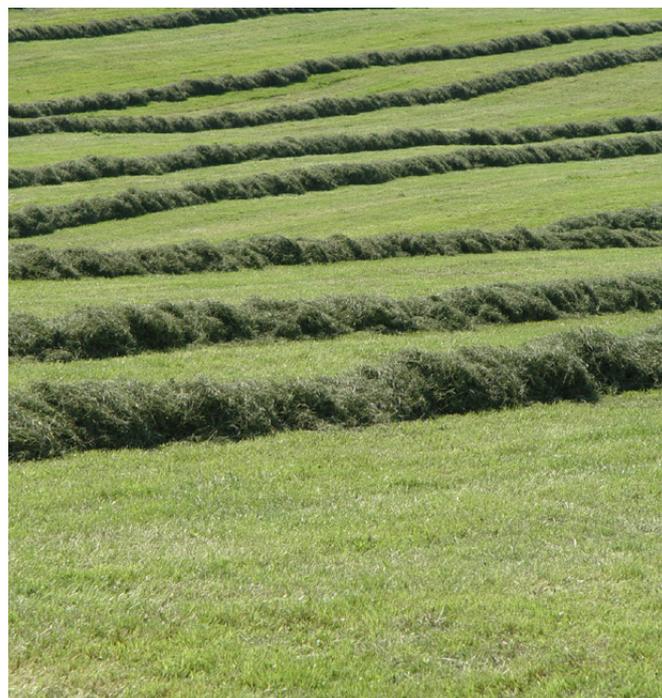


Figure 2. Les pertes au champ survenant lors du préfanage et fanage au sol, ainsi que lors de la récolte, sont prises en compte dans les valeurs de rendements présentées dans les tableaux 1a et 1b, mais pas les pertes de conservation (silo, séchoir ou tas).

6.1 Fertilisation azotée

De nombreux essais ont permis de préciser l'effet de la fertilisation azotée sur le rendement des prairies. L'efficacité de la fertilisation azotée varie très largement en fonction des conditions pédoclimatiques et se situe autour de 10 à 20 kg de MS supplémentaire par kg de N épandu pour les prairies intensives constituées de graminées et de trèfles (Reid 1978; Laidlaw 1980; Reid 1980; Thalmann 1985; Jeangros *et al.* 1994; Zimmermann *et al.* 1997; Elsässer 2000; Lehmann *et al.* 2001; Nevens et Rehuel 2003; Thomet *et al.*

Tableau 3b. Exemples de la quantité recommandée d'apport en kg de N, P, K et Mg par hectare et année calculée selon les recommandations de fertilisation du tableau 3a pour les moyennes indicatives de rendement indiquées dans le tableau 1b en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation.

Mode et intensité d'utilisation Nombre d'utilisations par année ¹	Altitude (m)	Rendement annuel ² (dt MS/ha)	Fertilisation recommandée (kg/ha/an)					
			N	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O	Mg
Prairie intensive³								
5–6 utilisations	≤ 500	130	143–170	47	107	287	345	33
5 utilisations	700	119	131–154	43	98	261	315	30
4 utilisations	900	107	118–139	39	88	236	284	27
3–4 utilisations	1'100	96	105–124	34	79	210	254	24
3 utilisations	1'300	84	92–109	30	69	185	223	21
Prairie mi-intensive³								
4–5 utilisations	≤ 500	98	78–107	30	70	185	224	20
4 utilisations	700	88	71–97	27	62	168	201	18
3 utilisations	900	79	63–87	25	56	150	181	16
2–3 utilisations	1'100	70	56–77	22	50	133	160	14
2 utilisations	1'300	61	49–67	19	43	115	140	12
Prairie peu intensive³								
3 utilisations	≤ 500	64	26–38	16	37	90	108	10
3 utilisations	700	58	23–35	14	33	81	98	9
2 utilisations	900	51	20–31	13	29	72	86	8
1–2 utilisations	1'100	45	18–27	11	26	63	76	7
1–2 utilisations	1'300	38	15–23	10	22	54	64	6
Pâturage intensif⁴ (> 3 UGB/ha/saison de pâture)⁵								
6–8 rotations	≤ 500	110	121–143	26 \ 18	60 \ 40	102 \ 28	123 \ 33	22
6–7 rotations	700	101	111–131	24 \ 16	56 \ 37	94 \ 25	113 \ 30	20
5–6 rotations	900	92	101–119	22 \ 15	51 \ 34	85 \ 23	103 \ 28	18
5 rotations	1'100	82	91–107	20 \ 13	45 \ 30	77 \ 21	92 \ 25	16
4 rotations	1'300	73	81–95	18 \ 12	40 \ 27	68 \ 18	82 \ 22	15
Pâturage mi-intensif⁴ (2–3 UGB/ha/saison de pâture)⁵								
5–6 rotations	≤ 500	82	58–82	18 \ 12	41 \ 26	71 \ 16	86 \ 20	12
5 rotations	700	75	52–75	16 \ 10	38 \ 24	65 \ 15	79 \ 18	11
4–5 rotations	900	67	47–67	15 \ 9	34 \ 21	58 \ 13	70 \ 16	10
4 rotations	1'100	59	42–59	13 \ 8	30 \ 19	51 \ 12	62 \ 14	9
3 rotations	1'300	52	36–52	11 \ 7	26 \ 17	45 \ 10	55 \ 13	8
Pâturage peu intensif (1–2 UGB/ha/saison de pâture)⁵								
2–4 rotations	≤ 500	52	0	9	21	19	23	0
2–4 rotations	700	47	0	8	18	17	20	0
2–3 rotations	900	42	0	7	16	15	18	0
1–3 rotations	1'100	36	0	6	14	13	16	0
1–2 rotations	1'300	31	0	5	11	12	14	0

¹ La dernière pâture en automne compte comme utilisation uniquement si le rendement est non négligeable (rendement ingéré > 10 dt MS/ha).

² Les rendements utilisés pour ces exemples correspondent aux moyennes indicatives selon l'altitude indiquées dans le tableau 1b. Le rendement prévisionnel de l'herbage doit être calculé en fonction des tableaux 1a et 1b, ainsi que des explications données dans le texte pour calculer la fertilisation adaptée aux conditions spécifiques de la parcelle concernée.

³ En cas de fauche-pâture, les restitutions par cycle de pâture indiquées dans le tableau 5 doivent être déduites des recommandations de fertilisation corrigées pour prairie.

⁴ La fertilisation P et K recommandée pour les pâturages mi-intensifs et intensifs est indiquée pour une pâture avec détention à l'étable (première valeur) et sans détention à l'étable (seconde valeur).

⁵ Le nombre d'UGB par hectare et par saison de pâture permet d'évaluer l'intensité d'exploitation moyenne sur l'ensemble de la surface pâturée lorsqu'il n'y a pas ou que très peu d'affouragement complémentaire à la crèche; selon les conditions du milieu, l'intensité d'utilisation peut varier fortement d'une parcelle à l'autre et les apports en éléments nutritifs doivent être adaptés à chaque situation.

Tableau 4. Relation entre les prélèvements et les recommandations de fertilisation pour P, K et Mg, en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation des herbages.

Mode et intensité d'utilisation	P	K	Mg
Prairie			
Intensive	1,00	0,75	1,3
Mi-intensive	0,95	0,70	1,2
Peu intensive	0,90	0,65	1,0
Extensive	-	-	-
Pâturage			
Intensif ¹	0,60 \ 0,40	0,30 \ 0,08	0,95
Mi-intensif ¹	0,60 \ 0,40	0,30 \ 0,07	0,80
Peu intensif	0,55	0,15	-
Extensif	-	-	-

¹ La première valeur pour P et K s'applique à une pâture avec détention à l'étable, la seconde à une pâture sans détention à l'étable; les différentes techniques de pâture sont définies dans le texte.

Tableau 5. Restitutions en P, K et Mg par cycle de pâture à déduire des recommandations de fertilisation pour les prairies fertilisées occasionnellement utilisées pour la pâture (prairies de fauche-pâturage). Ces restitutions sont valables pour une pâture moyenne équivalente à environ 15 dt MS/ha (rendement ingéré)¹.

Intensité d'utilisation	Système de pâture ²	Quantité à déduire par pâture ³ (kg/ha)				
		P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O	Mg
Intensive	Pâturage avec détention à l'étable	2,5	5,7	23	28	2,0
	Pâturage sans détention à l'étable	3,8	8,7	37	45	3,0
Mi-intensive	Pâturage avec détention à l'étable	2,0	4,5	22	27	1,5
	Pâturage sans détention à l'étable	2,8	6,5	30	36	2,0
Peu intensive	Tous les systèmes	1,7	4,0	19	23	0

¹ Voir chapitre 3 pour l'estimation du rendement ingéré.

² Les différents systèmes de pâture sont définis dans le texte.

³ La dernière pâture d'automne compte comme utilisation uniquement si le rendement est non négligeable (rendement ingéré > 10 dt MS/ha).

2008; Lalor *et al.* 2011). Cet effet se situe entre 20 et 30 kg MS par kg d'azote pour des graminées pures (Whitehead 2000). Dans les mélanges graminées-légumineuses, la fertilisation azotée a un effet moindre sur le rendement du fait de son impact négatif sur l'activité fixatrice des légumineuses et sur leur proportion dans la communauté végétale (Boller *et al.* 2003; Nyfeler *et al.* 2009; Nyfeler *et al.* 2011; la figure 4a présente un exemple). Par contre, le rapport entre le rendement total et la quantité de fertilisation azotée est nettement supérieur en présence de légumineuses que pour des graminées pures.

Les apports recommandés de N visent surtout à maintenir l'équilibre de la composition botanique: 50 à 70 % de graminées, 10 à 30 % de légumineuses (jusqu'à 70 % dans les prairies temporaires semées avec les mélanges à base de luzerne [type L] ou de trèfle violet [type M]), 10 à 30 % d'autres plantes (jusqu'à 40 % dans les prairies de fauche en montagne). En réduisant la quantité d'azote par apport, on favorise les lé-

gumineuses; en l'augmentant, on avantage les graminées dans les zones favorables ou les dicotylédones non-légumineuses (autres plantes) à tiges grossières dans les zones défavorables (Jeangros 1993; Pauthenet *et al.* 1994; Dietl et Lehmann 2004). La prolifération des autres plantes à tiges grossières indique donc souvent une fertilisation azotée trop élevée par rapport à la fréquence d'utilisation permise par les conditions du milieu (figure 3). Dans tous les cas, il convient de ne pas dépasser 50 kg N par ha et par utilisation. En montagne, il est déconseillé de majorer les apports recommandés, car les risques de dégradation de la composition botanique sont plus élevés.

En production fourragère, la recommandation de fertilisation azotée dépasse rarement 50 % du N prélevé par le fourrage (tableau 3a) car les plantes disposent d'autres sources d'approvisionnement: fixation symbiotique par les légumineuses, minéralisation de la matière organique du sol, arrière-effet d'apports réguliers d'engrais de ferme, dépôts atmosphériques. Pour les prairies intensives, une fertilisation azotée correspondant aux recommandations permet d'atteindre l'intervalle de rendements indiqué (tableau 1b) lorsque la part de trèfle dans la prairie est de 15 % ou plus (voir fixation symbiotique d'azote). En cas d'absence de trèfle, une fertilisation azotée plus élevée serait nécessaire pour atteindre ces rendements. Cependant, plus du double des quantités de N sont nécessaires pour qu'une prairie uniquement composée de graminées atteigne un rendement équivalent à un mélange graminées-légumineuses (Whitehead 2000; Nyfeler *et al.* 2009; Husse *et al.* 2016). Pour des questions d'efficacité d'utilisation du N, il est donc fortement déconseillé d'utiliser des cultures pures de graminées fourragères pour la production de fourrage pour ruminants.

Le tableau 7 donne les recommandations de fertilisation azotée, selon le type de prairie et le mode d'utilisation (fauche ou pâture). Elles sont indiquées par utilisation et non pas par année, car les apports doivent être répartis tout au long de la période de végétation. Les quantités indiquées dans le tableau 7 sont valables pour un nombre annuel d'utilisations standard, correspondant aux indications des tableaux 1b et 3b. Pour une prairie de fauche, on admet un rendement moyen par utilisation d'environ 25 dt MS/ha. Pour un pâturage intensif, le rendement moyen par utilisation est d'environ 15 dt MS/ha. Le nombre standard d'utilisations à prendre en considération pour établir la quantité stan-

Tableau 6. Prélèvements annuels en N, P, K et Mg et recommandations de fertilisation pour les mélanges graminées-légumineuses en culture dérobée, les semis d'août de prairies temporaires, ainsi que pour la production de semences de graminées et de légumineuses fourragères.

Type de culture	Rendement (dt MS/ha)		Prélèvements annuels (kg/ha)				Recommandations de fertilisation ³ (kg/dt MS resp. kg/ha)			
	Ø ¹	Intervalle ²	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
Mélanges graminées-légumineuses en culture dérobée, Semis d'août de prairies temporaire (année du semis)							1,2	0,36 (0,82)	2,2 (2,7)	0,3
Par utilisation	25	20–30	70	10 (23)	75 (90)	5	30	9 (21)	55 (66)	8
Production de semences										
Légumineuses pures avec production mi-intensive de fourrage							0	0,31 (0,71)	1,9 (2,3)	0,25
Par année	120	100–135	360	37 (85)	275 (331)	25	0	37 (85)	228 (275)	30
Graminées pures avec production mi-intensive de fourrage							1,4–1,9	0,31 (0,71)	1,9 (2,3)	0,25
Par année	120	100–135	230	39 (89)	266 (321)	26	170–230 ⁴	37 (85)	228 (275)	30
Graminées pures avec production très intensive de fourrage⁵							1,7–2,0	0,35 (0,80)	2,0 (2,4)	0,25
Par année	135	115–150	265	46 (105)	307 (370)	32	230–270 ⁴	44 (108)	270 (325)	30

¹ Moyenne indicative.

² Intervalles indiquant la variabilité de rendement provenant de la variabilité entre sites ainsi que de la variabilité interannuelle.

³ Les valeurs indiquées en kg/ha correspondent aux recommandations de fertilisation pour un rendement prévisionnel égal à la moyenne indicative donnée dans le tableau.

⁴ Fourchette correspondant à la fourchette de recommandations de fertilisation azotée en kg/dt MS pour la moyenne indicative de rendement.

⁵ Ce système de production n'est possible que dans des conditions naturelles particulièrement favorables.

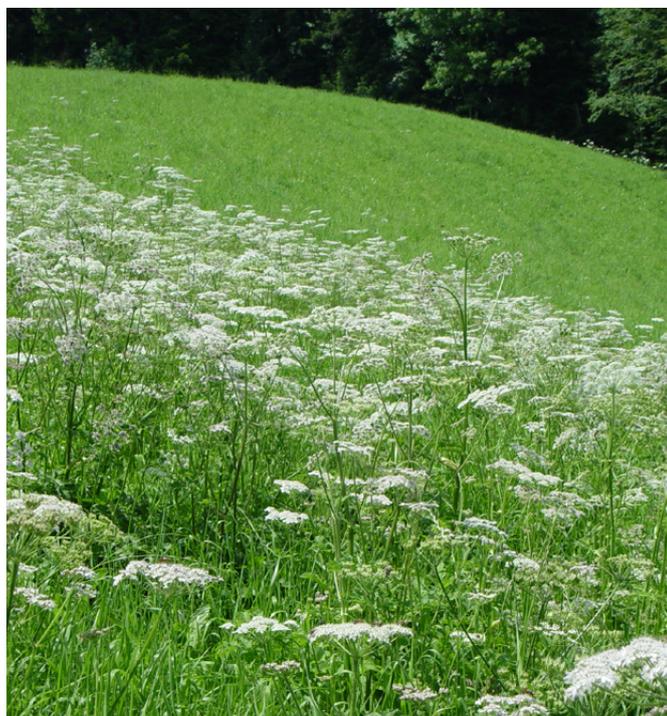


Figure 3. Dans les situations défavorables aux espèces de graminées pouvant valoriser beaucoup d'azote, une fertilisation azotée élevée favorise la prolifération de plantes nitrophiles à tiges grossières (ici *Heracleum sphondylium* L.) (photo: C. J. Stutz, Agroscope).

dard d'azote à apporter sur une année se calcule de la manière suivante:

Nombre standard d'utilisations pour prairie de fauche	=	$\frac{\text{Rendement annuel (dt MS/ha)}}{25 \text{ (dt MS/ha)}}$
Nombre standard d'utilisations pour pâturage intensif	=	$\frac{\text{Rendement annuel (dt MS/ha)}}{15 \text{ (dt MS/ha)}}$

Si le nombre effectif d'utilisations est plus élevé, le rendement par utilisation sera en général plus faible. Dans ce cas, il faut renoncer à un apport ou réduire la quantité par apport, de façon à ce que la somme des apports annuels ne dépasse pas la quantité standard (= rendement prévisionnel x recommandation de fertilisation en kg N/dt MS). Pour les pâturages intensifs, cinq apports de N répartis entre mai et septembre permettent une croissance de l'herbe plus régulière et mieux répartie sur la saison qu'une fertilisation azotée débutant au départ printanier de la végétation. La production de fourrage au printemps est ainsi légèrement réduite, celle de fin d'été et d'automne légèrement augmentée (Thomet et al. 2008). Des apports importants en automne augmentent en revanche le risque de lessivage des nitrates pendant l'hiver. Bien que les apports recommandés pour une pâture soient de 10 kg inférieurs à ceux pour une coupe, les apports annuels en N sont simi-

Tableau 7. Apports recommandés de N pour les prairies selon le type de prairie et le mode d'utilisation.

Type de prairie	Apport recommandé par coupe (kg N/ha)	Apport recommandé par pâture (kg N/ha)
Prairie permanente		
Intensive	30 ¹	15–20 ¹
Mi-intensive	25	15
Peu intensive	15 ²	0 ³
Extensive	0	0
Prairie temporaire		
Mélanges 1 an et 2 ans		
- à base de ray-grass d'Italie et/ou Westerwold	30 ^{1,4}	
Mélanges 3 ans et plus		
- luzerne-graminées (type L)	0 ^{4,5,6}	
- trèfle violet «Mattenklee»-graminées (type M)	0 ^{4,5}	
- graminées-trèfle blanc (type G et G*), mélanges type P	30 ^{1,4}	20 ^{1,4}
- esparcette-graminées (type E)	0	
- à base de fromental, d'avoine jaunâtre ou de brome (Mst 450, 451 et 455)	15 ^{2,7}	
Culture dérobée, semis d'août de prairie temporaire		
- une seule utilisation	30 ⁴	
- plusieurs utilisations	30 ⁴	
Production de semences		
- légumineuses pures	0 ⁴	
- graminées pures; pousse pour semences	50–100 ^{4,8}	
- graminées pures; pousse affourragée	50	

¹ Pour les prairies intensives, permanentes ou temporaires (mélanges 1 an et 2 ans, 3 ans et plus type G ou G*), l'apport de N par utilisation peut être légèrement majoré lorsque les conditions naturelles sont bonnes et si l'on veut favoriser les graminées au détriment des légumineuses (au maximum 50 kg N/ha par utilisation).

² Sous forme de fumier bien décomposé, éventuellement de purin très dilué après la 1^{re} coupe; des apports réguliers de purin ou d'azote minéral sont déconseillés.

³ Un apport de N par du fumier bien décomposé et appliqué pour couvrir les besoins en P et K (voir tableau 3a) est acceptable.

⁴ Un apport de 30 kg N/ha à la levée du semis est recommandé; il correspond à l'apport pour la première utilisation; lorsqu'il s'agit d'une culture dérobée hivernante et qu'il n'y aura pas d'utilisation avant l'hiver, l'apport doit être différé au printemps suivant.

⁵ Si la proportion de légumineuses est faible, ces mélanges peuvent être fertilisés comme les mélanges graminées-trèfle blanc.

⁶ Un apport annuel unique de 30 kg N/ha au printemps est recommandé. Lisier et purin sont à diluer fortement avant utilisation.

⁷ Ces mélanges ne reçoivent pas d'apport de N à la levée.

⁸ 50 kg N/ha au début de la période de végétation et un apport complémentaire éventuel (au maximum 50 kg N/ha selon le développement des plantes) au début de la montaison des graminées.

lares dans les deux cas, le nombre d'utilisations étant plus élevé pour un pâturage.

Les nouvelles prairies temporaires reçoivent en plus un apport de 20 à 30 kg N/ha à la levée, à l'exception des mélanges à base de fromental, d'avoine jaunâtre ou de brome (mélanges standard 450, 451 et 455; Mosimann *et al.* 2012) qui ne doivent pas être fertilisés à ce moment-là.

6.1.1 Fixation symbiotique d'azote

Les légumineuses (*Fabaceae*), notamment les trèfles et la luzerne, constituent un atout majeur en production fourragère par leur capacité à incorporer de grandes quantités de N dans le système et à réduire cet apport lorsque le système est déjà riche en N. En effet, les racines de ces espèces forment une symbiose avec des bactéries du genre

Rhizobium qui leur permet d'accéder à l'azote atmosphérique (fixation symbiotique d'azote) en investissant une certaine quantité d'énergie. En situation de faible disponibilité en N dans le sol, les légumineuses couvrent ainsi jusqu'à 90 % de leurs besoins en N par la fixation (p. ex. Oberson *et al.* 2013). Ceci est aussi valable en montagne (Jacot *et al.* 2000). Lorsque la quantité de N du sol disponible pour les légumineuses augmente, celles-ci réduisent leur activité symbiotique (p. ex. Hartwig 1998). Les légumineuses jouent donc un important rôle régulateur par rapport au niveau de N dans le système. De plus, en présence de graminées compétitives, la part de légumineuses dans la communauté végétale diminue avec l'augmentation de la disponibilité en N dans le sol (p. ex. Jeangros *et al.* 1993). En conséquence, une forte fertilisation azotée réduit la quantité de N fixée par la prairie, rapidement en réduisant l'activité symbiotique des légumineuses et, sur le long

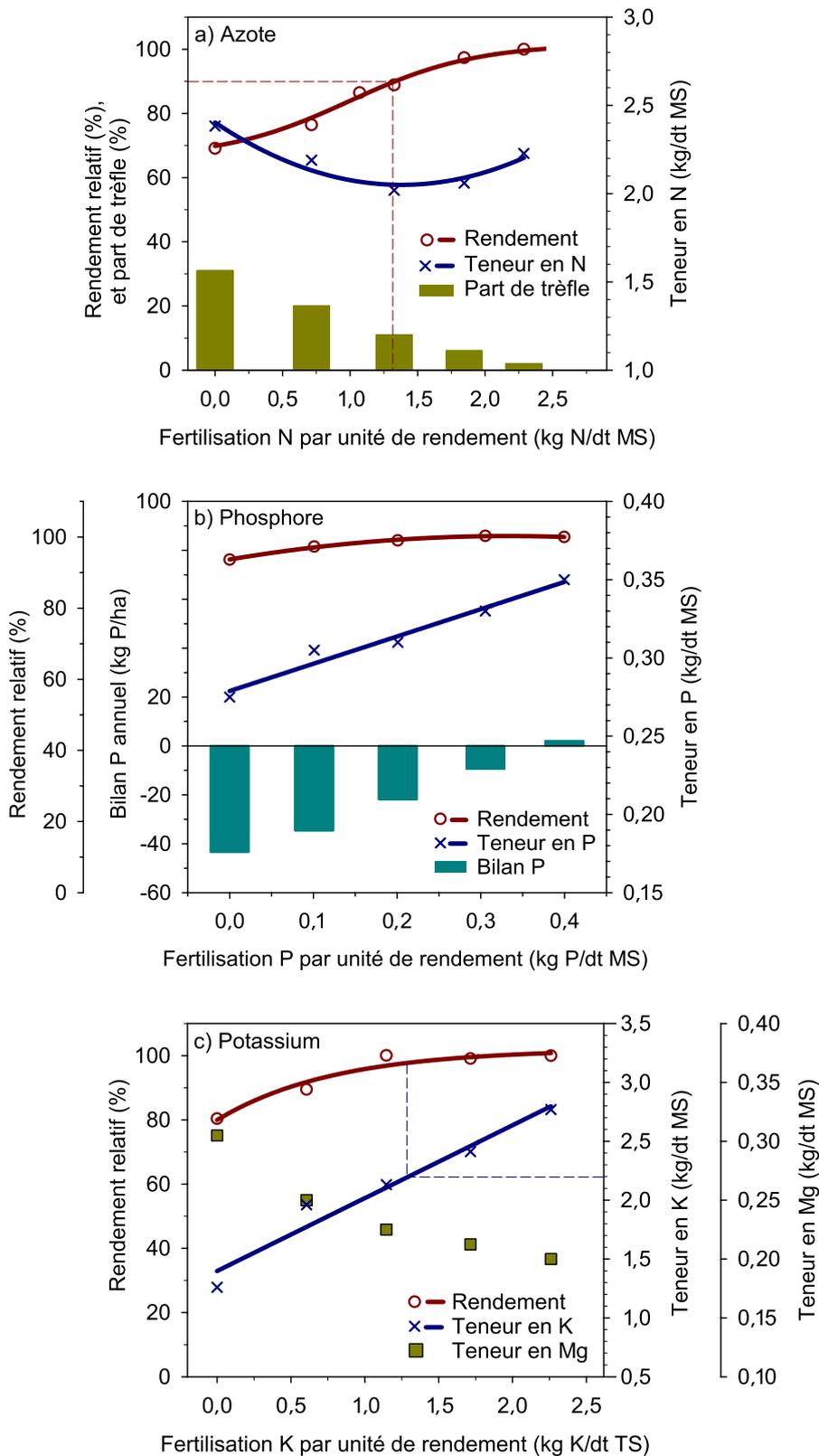


Figure 4. Illustration de l'effet de la fertilisation sur le rendement et les teneurs en N, P, K et Mg d'une prairie de fauche. Les résultats présentés ont été obtenus après 9 ans de fertilisation contrastée. Cet essai de fertilisation a été conduit sur une prairie permanente utilisée de manière intensive, dominée par du ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum* Lam.) et située à Hohenrain (610 m d'altitude, 1'100 mm de précipitations annuelles). Au début de l'essai, le niveau de fertilité du sol était satisfaisant pour P et K. Le rendement relatif représente le niveau de rendement par rapport au rendement maximal.

a) Effet de la fertilisation azotée sur le rendement, la teneur en N total dans le fourrage et la part de trèfles dans la prairie. Les niveaux de fertilisation azotée étaient de 0, 83, 167, 250 ou 333 kg N/ha/année (41 kg P et 232 kg K). Pour cette prairie riche en graminées, une fertilisation de 1,3 kg N/dt MS a permis d'atteindre 90 % du rendement maximal (trait interrompu vertical et horizontal) tout en préservant environ 10 % de trèfles dans la prairie et une efficacité de l'azote épandu de 30 % supérieure par rapport au niveau de fertilisation le plus élevé (en ce qui concerne l'augmentation du rendement). La teneur en N dans le fourrage ne s'élève pas avec l'augmentation de la fertilisation azotée, en raison de la diminution de la part de trèfles dans la prairie.

b) Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement, la teneur en P dans le fourrage et le bilan apports-prélèvements en P. Les niveaux de fertilisation phosphatée étaient de 0, 14, 28, 41, 55 kg P/ha/année (250 kg N, 232 kg K). La teneur en P dans le fourrage a augmenté de façon linéaire avec l'augmentation de la fertilisation phosphatée et le bilan en P s'est équilibré avec une fertilisation se situant entre 0,30 et 0,40 kg P/dt MS.

c) Effet de la fertilisation potassique sur le rendement, la teneur en K et la teneur en Mg dans le fourrage. Les niveaux de fertilisation potassique étaient de 0, 77, 155, 232 et 310 kg K/ha/année (250 kg N, 41 kg P). La teneur en K dans le fourrage a augmenté de façon linéaire avec l'augmentation de la fertilisation potassique. Une teneur en K de 2,2 kg K/dt MS a permis d'atteindre un rendement supérieur à 90 % du rendement maximal (trait interrompu vertical et horizontal). La teneur en Mg dans le fourrage diminue avec une augmentation de la fertilisation potassique (antagonisme K - Mg).

terme, en réduisant la part de légumineuses dans la communauté.

La quantité de N atmosphérique fixée par une prairie varie largement en fonction de sa part en légumineuses, de la productivité du site et du niveau de N dans le sol. Différents essais ont mesuré des quantités de N fixé dans la biomasse récoltée allant de 100 à 380 kg N/ha/an en situation de plaine (résumé par Lüscher *et al.* 2014). Dans les mélanges graminées-légumineuses avec une part en légumineuses ne dépassant pas 50 à 60 %, la quantité de N fixée par décitonne de rendement en légumineuses est d'environ 3 à 5 kg de N/an, dont environ 2 à 3 kg sont récoltés avec le fourrage (Boller *et al.* 2003; Høgh-Jensen *et al.* 2004; Unkovich *et al.* 2010). Au-delà d'une part en légumineuses de 50 à 60 %, une augmentation supplémentaire de la part de légumineuses n'augmente plus la quantité de N fixée (Nyfeler *et al.* 2011). La quantité de N fixée annuellement par une prairie produisant 130 dt MS/an et ayant une part de légumineuses de 15 % peut donc être estimée très approximativement à $4 \text{ kg N} \times 130 \text{ dt MS} \times 0,15 = 78 \text{ kg N/ha/an}$. En termes de rendement, des essais conduits en Suisse sur trois sites montrent que 15 % de trèfles dans la prairie équivalent à l'effet de 80 à 100 kg de N minéral appliqué sur des prairies composées uniquement de graminées (Nyfeler *et al.* 2009; Husse *et al.* 2016; Hofer *et al.* 2016). La fixation symbiotique d'azote par les légumineuses améliore la nutrition azotée des graminées de la communauté végétale (Nyfeler *et al.* 2011; Pirhofer-Walzl *et al.* 2012).

6.2 Fertilisation phosphatée

Les recommandations de fertilisation phosphatée se basent sur le principe du remplacement des quantités de P exportées des parcelles par la récolte ou l'ingestion du fourrage. Les adaptations de la fertilisation phosphatée en fonction des résultats de l'analyse de sol sont effectuées au moyen des facteurs de correction décrits dans le module 2. Pour préserver la diversité botanique des prairies peu intensives, les apports recommandés de P sont légèrement inférieurs aux prélèvements pour ce type de prairies (tableau 4). Dans ce cas, les 1 à 2 kg de P manquant annuellement par hectare sont prélevés dans les réserves du sol.

L'application d'une fertilisation phosphatée augmente le rendement des prairies lorsque la fourniture du sol en P est insuffisante (Duru et Ducrocq 1997; Philipp *et al.* 2004). Le rendement n'augmente néanmoins plus avec une augmentation de fertilisation phosphatée lorsque la fertilité en P du sol a atteint un niveau satisfaisant (Gallet *et al.* 2003; Liebisch *et al.* 2013). Lorsque la teneur en P atteint 0,30 kg/dt MS dans le fourrage du premier cycle récolté au stade début épiaison, le P n'est pas limitant pour la formation du rendement (Liebisch *et al.* 2013). Ce niveau de teneur en P dans le fourrage correspond aux teneurs de référence (Agroscope 2015b). La teneur en P dans le fourrage s'élève généralement avec l'augmentation de la fertilisation phosphatée (Gallet *et al.* 2003; Philipp *et al.* 2004; Stroia 2007). Ceci même au-delà de la teneur en P requise pour une croissance optimale des herbages (Liebisch *et al.*

2013), ce qui correspond à une consommation de luxe de la part des plantes. L'augmentation de la teneur en P dans le fourrage ne permet pas d'atteindre des prélèvements en P compensant l'augmentation de la fertilisation phosphatée. Une fertilisation supérieure à celle recommandée entraîne donc dans tous les cas un bilan apports-prélèvement positif (la figure 4b présente un exemple). Si ce bilan reste positif à long terme, le P s'accumule dans le sol (Messiga *et al.* 2014). Des stocks importants de P peuvent ainsi se former dans les sols sous prairies (Roger *et al.* 2014). Dans les prairies permanentes, la fertilisation phosphatée augmente de façon marquée la concentration en P dans les premiers centimètres du sol (Schärer *et al.* 2007). Une accumulation de P dans le sol augmente les risques de perte de P dans l'environnement (Stamm *et al.* 1998; Jordan *et al.* 2005).

6.3 Fertilisation potassique

Un niveau de fertilité élevé en K dans le sol entraîne une consommation de luxe par les plantes et une teneur élevée en K dans le fourrage. Cela entrave l'absorption du Mg et du calcium (Ca) par les plantes (antagonisme; Kayser et Isselstein 2005; la figure 4c présente un exemple) et favorise, avec d'autres éléments, la propagation de certaines plantes indésirables (ombellifères par exemple). En Suisse, la plupart des herbages sont actuellement riches en K (environ 2,5 à 3,5 kg K/dt MS dans les fourrages récoltés au stade début épiaison) en raison d'une disponibilité en K élevée dans de nombreux sols utilisés pour la production herbagère. Ces teneurs en K sont également excessives par rapport aux apports recommandés pour l'alimentation des herbivores (Schlegel et Kessler 2015) et réduisent l'absorbabilité ruminale du Mg, nécessitant une complémentation accrue en Mg. Les recommandations de fertilisation des prairies et des pâturages sont basées sur une teneur idéale en K (2,2 kg K/dt MS au stade début épiaison) qui assure une bonne croissance des plantes (Duru et Théliér-Huché 1995; Keady et O'Kiely 1998), favorise une composition botanique équilibrée et satisfait les besoins en K des animaux. Les adaptations de la fertilisation potassique en fonction des résultats de l'analyse de sol sont effectuées au moyen des facteurs de correction décrits dans le module 2. Bien que depuis de nombreuses années les apports recommandés en K soient nettement inférieurs aux prélèvements des herbages croissant sur des sols fortement pourvus en K, la teneur moyenne en K dans les fourrages reste actuellement élevée (Python *et al.* 2010; Schlegel *et al.* 2016). En effet, les exploitations herbagères exportent très peu de K, car le lait et la viande en contiennent peu (Sieber 2011), et les teneurs en K dans le sol et le fourrage ne diminuent de ce fait que très lentement même lorsqu'aucun engrais potassique n'est importé sur l'exploitation (Jeangros et Troxler 2006). La teneur de référence en K des engrais de ferme d'herbivores étant établie à partir de la teneur effective en K de la ration, avec comme principale source de K celle des herbages (2,5 à 3,5 kg K/dt MS), les apports en K par les engrais de ferme dépassent les besoins des prairies et des pâturages. Dans ces situations, il faut répartir les engrais de ferme de l'exploitation en fonction du N et du P et renoncer à importer des en-

grais contenant du K. Néanmoins, si les engrais de ferme épandus et le fourrage distribué aux animaux proviennent de l'exploitation, l'excédent de K calculé (différence entre les apports par les engrais de ferme et les besoins des herbages) ne surcharge pas davantage le bilan en K de l'exploitation, puisque les teneurs réelles des engrais de ferme de l'exploitation correspondent aux teneurs en K des fourrages de cette même exploitation. Pour les exploitations herbagères, il faut donc conclure d'un bilan K excédentaire qu'aucun apport d'engrais potassique n'est recommandé (bilan déjections animales – besoin des cultures). Il ne faut par contre pas reporter l'excédent calculé une année donnée dans le bilan de fertilisation de l'année suivante. Lorsque le fourrage contient entre 2,0 et 2,5 kg K/dt MS, il est recommandé de réduire la teneur en K des engrais de ferme issus des herbivores de l'exploitation de 15 % par rapport à la valeur de référence pour calculer le plan de fertilisation. Cette réduction sera de 30 % lorsque la teneur en K du fourrage est inférieure à 2,0 kg K/dt MS (module 4 «Propriétés et utilisation des fertilisants»). Lorsqu'une fertilisation potassique supplémentaire est nécessaire, des apports d'engrais minéraux supérieurs à 170 kg K/ha doivent être répartis en deux fois (par exemple au départ de la végétation et après la 1^{re} ou 2^e coupe).

6.4 Fertilisation magnésienne

A notre connaissance, très peu de résultats ont été publiés concernant l'effet de la fertilisation magnésienne sur le rendement des herbages dans des conditions pédologiques similaires à celles rencontrées en Suisse. Cet effet ne peut donc pas être quantifié pour nos sols, bien que certains essais aient été conduits en Nouvelle-Zélande et aux USA (Hogg et Karlovsky 1967; Reinbott et Blevins 1997; Hanly *et al.* 2005). Une série d'essais en pots montre que la teneur en Mg dans les feuilles à partir de laquelle la croissance du ray-grass est diminuée (moins de 0,10 kg/dt MS; Smith 1985) est inférieure à celle mesurée habituellement dans les fourrages en Suisse (tableau 2). Dans la plupart des cas, il est donc peu probable que la fertilisation magnésienne influence positivement le rendement des herbages. La teneur critique en Mg pour la croissance des graminées fourragères est cependant inférieure aux besoins des vaches laitières (Agroscope 2015a). De plus, le Mg est assez facilement lessivé des sols (Whitehead 2000). Il est de ce fait recommandé de remplacer approximativement, par la fertilisation, les quantités de Mg prélevées par la récolte du fourrage. En cas de teneur en Mg dans le fourrage trop faible par rapport aux besoins des animaux, il faut compléter la ration de ceux-ci et non pas augmenter la fertilisation magnésienne recommandée pour les herbages. Une fertilisation N et P basée sur les engrais de ferme suffit en général pour couvrir les besoins en Mg des herbages (module 4).

6.5 Fertilisation soufrée

Une fourniture suffisante en S est essentielle pour la synthèse des protéines et la formation du rendement en matière sèche. Les prairies temporaires, la luzerne pure ainsi que les prairies permanentes riches en bonnes graminées

et abondamment fertilisées en N ont des besoins en S importants. Pour ces prairies, les prélèvements annuels sont de l'ordre de 20 à 35 kg S/ha. Il convient de privilégier les épandages d'engrais de ferme pour ce type de situation car ces derniers contribuent largement à la fourniture de S assimilable par la prairie. En cas de carences en S, une fertilisation soufrée permet une augmentation significative du rendement des prairies intensives (Mathot *et al.* 2008). Lorsque nécessaire, un moyen efficace d'appliquer une fumure minérale soufrée est de la combiner avec une application de N en utilisant du sulfate d'ammonium. Des carences en S peuvent se manifester notamment dans des prairies de fauche conduites de façon intensive avec des apports importants de N minéral, sur des sols légers et pauvres en matière organique. Mais les situations de carence restent rares et des apports systématiques de S sont à déconseiller. Une méthode d'évaluation des risques de carence en S basée sur les conditions pédo-climatiques et la gestion de la parcelle est expliquée dans le chapitre 4.7 du module 2. Pour les graminées fourragères, la luzerne et les prairies intensives, un apport de 15 à 25 kg S/ha est recommandé dans le cas d'une situation avec risque de carence. Dans ce cas, l'application est effectuée au printemps plutôt qu'en été (Aeby et Dubach 2008). Sur les pâtures, environ 90 % du S prélevé par les animaux est restitué au travers des déjections (Nguyen et Goh 1994).

7. Diagnostic basé sur la teneur en éléments nutritifs dans le fourrage

L'analyse des teneurs en éléments nutritifs dans le fourrage peut utilement compléter l'analyse de sol pour dresser un diagnostic a posteriori du niveau de fertilisation des herbages. Les principes généraux concernant les analyses de plantes sont exposés dans le module 3.

Le diagnostic du statut de nutrition des prairies basé sur l'analyse des plantes est compliqué par le fait que les teneurs azotée et minérales du fourrage varient avec le stade de développement de la végétation au moment de la prise de l'échantillon et selon la composition botanique. Des méthodes de diagnostic basées sur le rapport des teneurs de deux ou plusieurs éléments ont donc été développées afin d'éviter cette difficulté (Salette et Huché 1991; Bailey *et al.* 1997).

La méthode des indices de nutrition phosphatée et potassique pour le diagnostic de l'état de nutrition des prairies est basée sur le rapport entre les teneurs en P, respectivement en K, et en N dans le fourrage (Duru et Théliier-Huché 1995). Ces indices permettent de comparer la teneur effective en P, respectivement en K, obtenue par l'analyse du fourrage avec celle permettant une croissance optimale en fonction de la teneur en N dans ce même fourrage. Cette méthode a d'abord été élaborée pour les prairies de graminées. Un facteur de correction a ensuite été calculé pour tenir compte de la part de légumineuses dans les prairies mixtes graminées-légumineuses (Jouany *et al.* 2004; Jouany *et al.* 2005). Il a été vérifié sur trois sites en Suisse

(Liebisch *et al.* 2013). Lorsque les teneurs azotée et minérales sont déterminées à partir d'un échantillon mélangé (graminées et légumineuses mélangées dans un même échantillon), les indices de nutrition sont évalués de la manière suivante:

Indice de nutrition phosphatée	=	$100 \times \frac{\text{Teneur en phosphore}}{0,15 + 0,065 \times \text{Teneur en azote}} + (0,5 \times \text{Part de légumineuses})$
Indice de nutrition potassique	=	$100 \times \frac{\text{Teneur en potassium}}{1,6 + 0,525 \times \text{Teneur en azote}} + (0,5 \times \text{Part de légumineuses})$

Pour ces équations (Jouany *et al.* 2005), les teneurs en N, P et K sont exprimées en pourcent, ce qui correspond aux valeurs en kg/dt de MS indiquées dans le tableau 2. Les analyses de fourrage sont effectuées sur des échantillons récoltés lors du 1^{er} cycle. La part de légumineuses dans la prairie est exprimée en pourcent de la biomasse récoltée. Ces indices ne sont pas valables dans des conditions de sur-fertilisation en N.

Exemple: si les teneurs en N, P et K dans le fourrage d'une prairie ayant une part de légumineuses de 15 % sont respectivement 2,5, 0,33 et 2,8 kg/dt MS, alors l'indice de nutrition phosphatée est de 113 est celui de nutrition potassique de 104.

Le facteur de correction pour la part de légumineuses n'a pas été testé pour des prairies avec plus de 50 % de légumineuses. Pour les prairies riches en légumineuses, il est donc préférable de réaliser les analyses après avoir retiré les légumineuses des échantillons de fourrage.

L'interprétation des indices de nutrition phosphatée et potassique ainsi obtenus est décrite dans le tableau 8. L'indice de nutrition phosphatée d'une prairie montre cependant des valeurs très variables selon les années (Stroia 2007). Une moyenne sur plusieurs années est donc nécessaire pour un diagnostic sûr.

Tableau 8. Recommandations de fertilisation basées sur l'interprétation des indices de nutrition phosphatée et potassique (interprétation selon Salette et Huché 1991).

Indice	Interprétation	Recommandations
> 120	excédentaire	Réduire la fertilisation P ou K des parcelles concernées en utilisant les recommandations de fertilisation du tableau 3a, après avoir réévalué le rendement ainsi que l'intensité d'utilisation en fonction du nombre d'utilisations et du niveau de fertilisation azotée.
80 à 120	satisfaisant	Fertilisation correspondant aux recommandations du tableau 3a.
< 80	insuffisant	Planifier une fertilisation de redressement en fonction des analyses de sol selon le module 2/ Caractérisation et analyses du sol.

Le principe des indices de nutrition basés sur le rapport entre la teneur de l'élément concerné et la teneur en N dans le fourrage a également été testé pour le S (Mathot *et al.* 2009). Les seuils obtenus dans cette étude doivent cependant encore être validés avant qu'une interprétation

des besoins en S puisse être conseillée. Un rapport S/N inférieur à 0,07 (de 0,065 à 0,075 selon les études) semble indiquer une situation de déficience en S, alors qu'un rapport supérieur indique une nutrition soufrée satisfaisante (Bailey *et al.* 1997; Whitehead 2000; Mathot *et al.* 2009). Cette valeur indicative est valable pour les prairies riches en graminées alors que ce seuil est plus bas pour les prairies riches en légumineuses (Jones et Sinclair 1991; Whitehead 2000).

8. Engrais de ferme

La majeure partie des éléments nutritifs exportés des herbages par la récolte et l'ingestion de fourrage se retrouvent dans les engrais de ferme (voir module 4). Pour les exploitations herbagères, la gestion raisonnée de la fertilisation passe donc par un recyclage adéquat des engrais de ferme à l'échelle de l'exploitation. Les teneurs indicatives en éléments nutritifs dans les différents types d'engrais de ferme sont indiqués dans le tableau 6 du module 4. Ce tableau montre que le rapport entre les teneurs des différents éléments nutritifs est fortement influencé par le type d'engrais de ferme, ce dont il faut tenir compte lors de la répartition des engrais de ferme sur l'exploitation. On évitera par exemple d'épandre du purin pauvre en fèces sur des herbages dont le sol est enrichi en K, car le rapport K:N disponible est particulièrement élevé pour ce type d'engrais de ferme. Plus d'informations sur l'utilisation des engrais de ferme sont données dans le module 4.

9. Restitutions au pâturage

Pour les pâturages, les apports d'engrais recommandés sont inférieurs aux quantités de nutriments contenues dans les fourrages ingérés par les animaux, car des éléments nutritifs sont directement restitués par les déjections pendant la pâture. Dans les recommandations de fertilisation pour les pâturages (aucune fauche) indiquées dans le tableau 3a, les restitutions pendant la pâture sont déjà prises en compte. Celles-ci dépendent de la technique de pâture, en particulier de sa durée journalière et de la part de la ration consommée au pâturage. Pour les pâturages intensifs et mi-intensifs, le tableau 3a indique deux recommandations de fertilisation. La première est valable pour les systèmes de pâture avec détention à l'étable dans lesquels les animaux consacrent l'essentiel du temps dispo-

nible sur le pâturage à se nourrir (par exemple 50 % d'affouragement au pâturage pendant 5 à 6 heures de pâture par jour, ou près de 100 % avec 10 à 12 h). La seconde valeur s'applique à une pâture sans détention à l'étable (les animaux se nourrissent entièrement sur le pâturage où ils séjournent en permanence, sauf éventuellement pendant la traite pour les vaches laitières), aussi appelée pâture intégrale. Dans ce cas, la majeure partie des éléments nutritifs ingérés par les animaux est excrétée sur le pâturage et les exportations sont faibles. Les recommandations de fertilisation ne diminuent toutefois pas proportionnellement à l'augmentation des déjections sur le pâturage, car la répartition des bouses et des pissats est moins régulière lorsque les animaux sont en permanence sur le pâturage. Les pâturages non prioritairement destinés à l'affouragement du bétail ne doivent pas être fertilisés car les quantités importantes d'éléments nutritifs apportés par les déjections suffisent à couvrir les besoins des plantes.

Pour les prairies occasionnellement pâturées (fauche-pâturage), les restitutions dues à la pâture sont déduites des recommandations pour prairie de fauche. Les restitutions désignent les quantités moyennes d'éléments nutritifs qui peuvent être valorisées par les plantes lors d'une pâture moyenne (rendement consommé d'environ 15 dt MS/ha, soit environ 95 UGB jours/ha pour une consommation journalière de 16 kg MS/UGB/jour). Le tableau 5 donne les restitutions par la pâture en P, K et Mg, selon l'intensité d'exploitation et la technique de pâture.

Jusqu'à 80 % du N prélevé par les animaux au pâturage lui sont restitués par les déjections (Haynes et Williams 1993). Le N est ainsi déposé de manière très concentrée, avec des quantités correspondant à plus de 500 kg N/ha à l'endroit du dépôt d'un pissat ou d'une bouse (Ball et Ryden 1984; Whitehead 2000). La très forte concentration en N à l'endroit des déjections ainsi que la répartition très irrégulière induisent une utilisation peu efficace de ce N par les

plantes. Le N des restitutions des animaux au pâturage est ainsi nettement moins efficace pour le système de production que le N excrété par les animaux en stabulation puis épandu de façon homogène avec les engrais de ferme sur la surface à fertiliser. En effet, en comparaison avec le N des engrais de ferme, celui des restitutions des animaux au pâturage subit des pertes plus élevées, est nettement moins efficace pour la production de biomasse et est moins efficacement prélevé par les plantes. L'institut national de recherche agronomique français (INRA) a récemment conduit un travail de synthèse sur les flux de N en agriculture (Peyraud *et al.* 2012). Dans cette synthèse, les auteurs retiennent les valeurs suivantes pour la part totale de N des déjections prélevé par les plantes à l'endroit des restitutions: 30–35 % pour les pissats et seulement 10–20 % pour les bouses. Sur la base de différentes études sur l'effet des déjections sur la production de biomasse, l'effet sur le rendement peut être estimé à un ordre de grandeur de 3 à 5 kg MS par kg de N dans les déjections en moyenne pour les pissats et les bouses (Day et Detling 1990; Deenen et Middelkoop 1992; Williams et Haynes 1994; Williams et Haynes 1995; Decau *et al.* 2003; Di et Cameron 2007; Troxler *et al.* 2008; Moir *et al.* 2013; White-Leech *et al.* 2013). Pour un pâturage intensif brouté par des vaches laitières et avec un nombre de jours de pâture nécessaires à la consommation de l'ensemble du fourrage produit par le pâturage, l'effet sur le rendement du N contenu dans les déjections au pâturage serait ainsi de seulement 5 à 8 % par rapport au rendement total. La variabilité des valeurs obtenues dans ces différentes études est cependant très importante.

10. Entretien calcique du sol

L'entretien calcique du sol est traité dans le chapitre 5 du module 2. Les spécificités liées aux herbages sont décrites dans le chapitre 5.3.2 de ce module.

11. Bibliographie

- Aeby P. & Dubach S., 2008. Schwefelversorgung von Wiesen: Düngung ausnahmsweise nötig. *UFA-Revue* 3/2008, 50–51.
- Agroscope, 2015a. Apports alimentaires recommandés et tables de la valeur nutritive pour les ruminants (Livre vert). Accès: <http://www.agroscope.admin.ch/futtermitteldatenbank/04834/index.html?lang=fr> [9 oct. 2015].
- Agroscope, 2015b. Base suisse de données des aliments pour animaux. Accès: <http://www.feedbase.ch> [9 oct. 2015].
- Bailey J. S., Cushnahan A. & Beattie J. A. M., 1997. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for diagnosing the nutrient status of grassland swards: II. Model calibration and validation. *Plant Soil* 197, 137–147.
- Ball P. R. & Ryden J. C., 1984. Nitrogen relationships in intensively managed temperate grasslands. *Plant Soil* 76, 23–33.
- Boller B. C., Lüscher A. & Zanetti S., 2003. Schätzung der biologischen Stickstoff-Fixierung in Klee-Gras-Beständen, Schriftenreihe der FAL 45, 47–54.
- Daccord R., Arrigo Y., Kessler J., Jeangros B., Scephovic J., Schubiger F.X. & Lehmann J., 2001. Valeur nutritive des plantes des prairies. 3. Teneurs en calcium, phosphore, magnésium et potassium. *Rev. suisse Agric.* 33, 141–146.
- Day T. A. & Detling J. K., 1990. Grassland patch dynamics and herbivore grazing preference following urine deposition. *Ecology* 71, 180–188.
- Decau M. L., Simon J. C & Jacquet A., 2003. Fate of urine nitrogen in three soils throughout a grazing season. *J. Environ. Qual.* 32, 1405–1413.
- Deenen P. J. A. G. & Middelkoop N., 1992. Effects of cattle dung and urine on nitrogen uptake and yield of perennial ryegrass. *Neth. J. Agr. Sci.* 40, 469–482.
- Di H. J. & Cameron K. C., 2007. Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor – a lysimeter study. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 79, 281–290.
- Dietl W., 1986. Pflanzenbestand, Bewirtschaftungsintensität und Ertragspotential von Dauerwiesen. *Schweiz. Landwirtsch. Monatshefte* 64, 241–262.
- Dietl W. & Lehmann J., 2004. Ökologischer Wiesenbau; Nachhaltige Bewirtschaftung von Wiesen und Weiden. Österreicherischer Agrarverlag, Leopoldsdorf, 136 p.
- Duru M. & Ducroq H., 1997. A nitrogen and phosphorus herbage nutrient index as a tool for assessing the effect of N and P supply on the dry matter yield of permanent pastures. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 47, 59–69.
- Duru M. & Thélier-Huché L., 1995. N and P-K status of herbage: use for diagnosis of grasslands, in: INRA (Ed.), Diagnostic Procedures for Crop N Management and Decision Making, Paris (Les Colloques n° 82), 125–138.
- Elsässer M., 2000. Auswirkungen reduzierter Stickstoffdüngung auf Erträge, Futterwert und Botanische Zusammensetzung von Dauergrünland sowie Nährstoffverhältnisse im Boden. *Wissenschaftl. Fachverl.* 164 p.
- Fabre B. & Kockmann F., 2006. Les effets du chaulage sur les prairies permanentes ou de longue durée. Synthèse bibliographique. *Fourrages* 185, 103–122.
- Gallet A., Flisch R., Ryser J.-P., Nösberger J., Frossard E. & Sinaj S., 2003. Uptake of residual phosphate and freshly applied diammonium phosphate by *Lolium perenne* and *Trifolium repens*. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 557–567.
- Hanly J. A., Loganathan P. & Currie L. D., 2005. Effect of serpentine rock and its acidulated products as magnesium fertilisers for pasture, compared with magnesium oxide and Epsom salts, on a Pumice Soil. 1. Dry matter yield and magnesium uptake. *New Zeal. J. Agr. Res.* 48, 451–446.
- Haynes R. J. & Williams P. H., 1993. Nutrient Cycling and Soil Fertility in the Grazed Pasture Ecosystem. *Adv. Agron.* 49, 119–199.
- Hofer D., Suter M., Haughey E., Finn J. A., Hoekstra N. J., Buchmann N. & Lüscher A., 2016. Yield of temperate forage grassland species is either largely resistant or resilient to experimental summer drought. *J. Appl. Ecol.* doi:10.1111/1365-2664.12694
- Hogg D. E. & Karlovsky J., 1968. The relative effectiveness of various magnesium fertilisers on a magnesium-deficient pasture. *New Zeal. J. Agr. Res.* 11, 171–183.
- Humbert J.-Y., Dwyer J. M., Andrey A. & Arlettaz R., 2015. Impacts of nitrogen addition on plant biodiversity in mountain grasslands depend on dose, application duration and climate: a systematic review. *Glob. Change Biol.* 22, 110–120.
- Husse S., Huguenin-Elie O., Buchmann N. & Lüscher A., 2016. Larger yields of mixtures than monocultures of cultivated grassland species match with asynchrony in shoot growth among species but not with increased light interception. *Field Crops Res.* 194, 1–11.
- Jacot K. A., Lüscher A., Nösberger J. & Hartwig U. A., 2000. Symbiotic N₂ fixation of various legume species along an altitudinal gradient in the Swiss Alps. *Soil Biol. Biochem.* 32, 1043–1052.
- Jeangros B. & Thöni E., 1994. Utilisation des engrais de ferme sur les prairies permanentes. Synthèse de résultats expérimentaux et recommandations préconisées en Suisse. *Fourrages* 140, 393–406.
- Jeangros B. & Troxler J., 2006. Bilan des éléments fertilisants sur une exploitation laitière de montagne. *Rev. suisse Agric.* 38 (3), 121–125.
- Jeangros B., 1993. Prairies permanentes en montagne. I. Effets de la fréquence des coupes et de la fertilisation azotée sur la composition botanique. *Rev. suisse Agric.* 25, 345–360.
- Jeangros B., Scephovic J., Schubiger F. X., Lehmann J., Daccord R. & Arrigo, Y., 2001. Valeur nutritive des plantes de prairies. 1. Teneurs en matière sèche, matière azotée et sucres. *Rev. suisse Agric.* 33, 73–80.
- Jones M. B. & Sinclair A. G., 1991. Application of DRIS to white clover based pastures. *Commun. Soil Sci. Plan.* 22, 1895–1918.

- Jordan P., Menary W., Daly K., Kiely G., Morgan G., Byrne P. & Moles R., 2005. Patterns and processes of phosphorus transfer from Irish grassland soils to rivers – integration of laboratory and catchment studies. *J. Hydrol.* 304, 20–34.
- Jouany C., Cruz P., Petibon P. & Duru M., 2004. Diagnosing phosphorus status of natural grassland in the presence of white clover. *Eur. J. Agron.* 21, 273–285.
- Jouany C., Cruz P., Theau J. P., Petibon P., Foucras J. & Duru M., 2005. Diagnostic du statut de nutrition phosphatée et potassique des prairies naturelles en présence de légumineuses. *Fourrages* 184, 547–555.
- Kayser M. & Isselstein J., 2005. Potassium cycling and losses in grassland systems: a review. *Grass Forage Sci.* 60, 213–224.
- Keady T. M. J. & O’Kiely P., 1998. An evaluation of potassium and nitrogen fertilisation of grassland, and date of harvest, on fermentation, effluent production, dry-matter recovery and predicted feeding value of silage. *Grass Forage Sci.* 53, 326–337.
- Laidlaw 1980. The effects of nitrogen fertilizer applied in spring on swards of ryegrass sown with four cultivars of white clover. *Grass Forage Sci.* 35, 295–299.
- Lalor S. T. J., Schröder J. J., Lantinga E. A., Oenema O., Kirwan L. & Schulte R. P. O., 2011. Nitrogen fertilizer replacement value of cattle slurry in grassland as affected by method and timing of application. *J. Environ. Qual.* 40, 362–373.
- Lauber K., Wagner G. & Gygax A., 2012. *Flora Helvetica - Flore illustrée de Suisse*. Haupt Verlag, Berne.
- Lazzarotto P., Calanca P., Semenov M. & Fuhrer J., 2010. Transient responses to increasing CO₂ and climate change in an unfertilized grass-clover sward. *Climate Res.* 41, 221–232.
- Lehmann J., Rosenberg E. & und Briner H.-U., 2001. Modell für die Berechnung des Ertrages von Klee-Gras-Mischungen. *Agrarforsch.* 8 (9), 364–369.
- Liebisch F., Bünemann E. K., Huguenin-Elie O., Jeangros B., Frossard E. & Oberson A., 2013. Plant phosphorus nutrition indicators evaluated in agricultural grasslands managed at different intensities. *Eur. J. Agron.* 44, 67–77.
- Mathot M., Mertens J., Verlinden G., Lambert R., 2008. Positive effects of sulphur fertilisation on grasslands yields and quality in Belgium. *Eur. J. Agron.* 28, 655–658.
- Mathot M., Théliier-Huché L. & Lambert R., 2009. Sulphur and nitrogen content as sulphur deficiency indicator for grasses. *Eur. J. Agron.* 30, 172–176.
- Meisser M., Deléglise C., Mosimann E., Signarbieux C., Mills R., Schlegel P., Buttler A. & Jeangros B., 2013. Effets d’une sécheresse estivale sévère sur une prairie permanente de montagne du Jura. *Rech. Agron. Suisse* 4 (11–12), 476–483.
- Messiga A. J., Ziadi N., Bélanger G. & Morel C., 2014. Relationship between soil phosphorus and phosphorus budget in grass swards with varying nitrogen applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78, 1481–1488.
- Moir J. L., Edwards G. R. & Berry L. N., 2013. Nitrogen uptake and leaching loss of thirteen temperate grass species under high N loading. *Grass Forage Sci.* 68, 313–325.
- Mosimann E., 2005. Caractéristiques des pâturages pour vaches laitières dans l’ouest de la Suisse. *Rev. suisse Agric.* 37 (3), 99–106.
- Mosimann E., Deléglise C., Demenga M., Frund D., Sinaj S. & Charles R., 2013. Disponibilité en eau et production fourragère en zone de grandes cultures. *Rech. Agron. Suisse* 4 (11–12), 468–475.
- Mosimann E., Meisser M., Deléglise C. & Jeangros B., 2012. Potentiel fourrager des pâturages du Jura. *Rech. Agron. Suisse* 3 (11–12), 516–523.
- Mosimann E., Suter D., Frick R. & Rosenberg E., 2012. Mélanges standard pour la production fourragère. Révision 2013–2016. *Rech. Agron. Suisse* 3 (10), 1–12.
- Nevens F. and Rehuel D., 2003. Effects of cutting or grazing grass swards on herbage yield, nitrogen uptake and residual soil nitrate at different levels of N fertilization. *Grass Forage Sci.* 58, 431–449.
- Nguyen M. L. & Goh K. M., 1994. Sulphur cycling and its implications on sulphur fertilizer requirements of grazed grassland ecosystems. *Agr. Ecosyst. Environ.* 49, 173–206.
- Nyfelser D., Huguenin-Elie O., Suter M., Frossard E. & Lüscher A., 2011. Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources. *Agr. Ecosyst. Environ.* 140, 155–163.
- Nyfelser D., Huguenin-Elie O., Suter M., Frossard E., Connolly J. & Lüscher A., 2009. Strong mixture effects among four species in fertilized agricultural grassland led to persistent and consistent transgressive overyielding. *J. Appl. Ecol.* 46, 683–691.
- Pauthenet Y., Roumet, J. P., Neyroz A., 1994. Influence de la fertilisation azotée sur la végétation de prairies de fauche en vallée d’Aoste (Italie). *Fourrages* 139, 375–378.
- Peyraud J.-L., Cellier P., Donnars C. & Réchauchère O. (éditeurs), 2012. Les flux d’azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 68 p.
- Philipp A., Huguenin-Elie O., Flisch R., Gago R., Stutz C., Kessler W. & Sinaj S., 2004. Einfluss der Phosphordüngung auf eine Fromentalwiese. *Agrarforsch.* 11 (3), 86–91.
- Python P., Boessinger M. & Buchmann M., 2010. Teneur moyenne en minéraux majeurs des fourrages secs ventilés selon l’altitude et la situation géographique. *ETH-Schriftenreihe zur Tierernährung* 33, 159–162.
- Reid D., 1978. The effects of frequency of defoliation on the yield response of a perennial ryegrass sward to a wide range of nitrogen application rates. *J. Agr. Sci., Cambridge* 90, 447–457.
- Reid D., 1980. The effects of rates of potassium application on the production and quality of herbage from a perennial ryegrass sward receiving a wide range of nitrogen rates. *J. Agr. Sci., Cambridge* 95, 83–100.
- Reinbott T. M. & Blevins D. G., 1997. Phosphorus and magnesium fertilization interaction with soil phosphorus level: Tall fescue yield and mineral element content. *J. Prod. Agric.* 10, 260–265.
- Roger A., Libohova Z., Rossier N., Joost S., Maltas A., Frossard E. & Sinaj S., 2014. Spatial variability of soil phos-

- phorus in the Fribourg canton, Switzerland. *Geoderma* 217–218, 26–36.
- Salette J. & Huché L., 1991. Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par l'analyse de végétal: principes, mis en oeuvre, exemples. *Fourrages* 125, 3–18.
- Schärer M., Stamm C., Vollmer T., Frossard E., Oberson A., Flühler H. & Sinaj S., 2007. Reducing phosphorus losses from over-fertilized grassland soils proves difficult in the short term. *Soil Use Manage.* 23 (Suppl. 1), 154–164.
- Schlegel P. & Kessler J., 2015. Minéraux et vitamines. Dans: Apports alimentaires recommandés et tables de la valeur nutritive pour les ruminants (Livre vert), chapitre 4, Ed. Agroscope, Posieux. Accès: <http://www.agroscope.admin.ch/futtermitteldatenbank/04834/index.html?lang=fr> [9 oct. 2015]
- Schlegel P., Wyss U., Arrigo Y. & Hess H.-D., 2016. Mineral concentrations of fresh herbage from mixed grassland as influenced by botanical composition, harvest time and growth development. *Anim. Feed Sci. Tech.* 219, 226–233.
- Sieber R., 2011. Zusammensetzung von Milch und Milchprodukten schweizerischer Herkunft. ALP Science n°538, Agroscope, Berne. 40 p.
- Smith G. S., 1985. Critical leaf concentrations for deficiencies of nitrogen, potassium, phosphorus, sulphur, and magnesium in perennial ryegrass. *New Phytol.* 101, 393–409.
- Stamm C., Flühler H., Gächter R., Leuenberger J. & Wunderli H., 1998. Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *J. Environ. Qual.* 27, 515–522.
- Stroia C., 2007. Etude de fonctionnement de l'écosystème prairial en conditions de nutrition N et P sub limitantes. Application au diagnostic de nutrition. Thèse de doctorat N° 2446, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Thalmann H., 1985. Wirkung belüfteter und unbelüfteter Rindergülle unter Schnitt und Beweidung auf Dauergrünland. Diss. Technische Universität München.
- Thomet P., Stettler M., Hadorn M. & Mosimann E., 2008. Pâturages: production pilotée par la fumure azotée. *Rev. suisse Agric.* 40 (1), 41–45.
- Troxler J., Ryser J. P. & Jeangros B., 2008. Influence des déjections bovines sur un gazon de graminées cultivé en lysimètres. *Rev. suisse Agric.* 40 (6), 259–265.
- Unkovich M. J., Baldock J. & Peoples M. B., 2010. Prospects and problems of simple linear models for estimating symbiotic N₂ fixation by crop and pasture legumes. *Plant Soil* 329, 75–89.
- Whitehead D. C., 2000. Nutrient elements in grassland: soil-plant-animal relationships. CAB International, Wallingford, UK, 369 p.
- White-Leech R., Liu K., Sollenberger L. E., Woodard K. R. & Interrante S. M., 2013. Excreta deposition on grassland patches. I. Forage harvested, nutritive value, and nitrogen recovery. *Crop Sci.* 53, 688–695.
- Williams P. H. & Haynes R. J., 1994. Comparison of initial wetting pattern, nutrient concentrations in soil solution and the fate of 15N labelled urine in sheep and cattle urine patch areas of pasture soil. *Plant Soil* 162, 49–59.
- Williams P. H. & Haynes R. J., 1995. Effect of sheep, deer and cattle dung on herbage production and soil nutrient content. *Grass Forage Sci.* 50, 263–271.
- Wyss U. & Kessler J., 2002. L'intensité d'exploitation des prairies influence la teneur en minéraux de l'herbe. *Rev. suisse Agric.* 9, 292–297.
- Zimmermann M., Koch B., Kessler W. & Besson J. M., 1997. Der Güllezeitpunkt entscheidet über die N-Wirkung. *Agrarforsch.* 4 (3), 133–136.

12. Liste des tableaux

Tableau 1a. Relation entre l'altitude (m) et le potentiel moyen de rendement (dt MS/ha) en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation.....	9/4
Tableau 1b. Exemples d'estimations du rendement annuel récolté en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation ainsi que de l'altitude à l'aide des équations indiquées dans le tableau 1a	9/5
Tableau 2. Teneurs en macro-éléments dans les herbages de composition botanique équilibrée en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation.....	9/6
Tableau 3a. Prélèvements annuels indicatifs et recommandations de fertilisation en kg de N, P, K et Mg par unité de matière sèche produite pour les herbages en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation	9/6
Tableau 3b. Exemples de la quantité recommandée d'apport en kg de N, P, K et Mg par hectare et année calculée selon les recommandations de fertilisation du tableau 3a pour les moyennes indicatives de rendement indiquées dans le tableau 1b en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation	9/8
Tableau 4. Relation entre les prélèvements et les recommandations de fertilisation pour P, K et Mg, en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation des herbages.....	9/9
Tableau 5. Restitutions en P, K et Mg par cycle de pâture à déduire des recommandations de fertilisation pour les prairies fertilisées occasionnellement utilisées pour la pâture (prairies de fauche-pâture).....	9/9
Tableau 6. Prélèvements annuels en N, P, K et Mg et recommandations de fertilisation pour les mélanges graminées-légumineuses en culture dérobée, les semis d'août de prairies temporaires, ainsi que pour la production de semences de graminées et de légumineuses fourragères.....	9/10
Tableau 7. Apports recommandés de N pour les prairies selon le type de prairie et le mode d'utilisation	9/11
Tableau 8. Recommandations de fertilisation basées sur l'interprétation des indices de nutrition phosphatée et potassique.	9/15

13. Liste des figures

Figure 1. Types de prairies selon la fréquence des utilisations et le niveau de fertilisation correspondant.	9/3
Figure 2. Les pertes au champ survenant lors du préfanage et fanage au sol, ainsi que lors de la récolte, sont prises en compte dans les valeurs de rendements présentées dans les tableaux 1a et 1b, mais pas les pertes de conservation (silo, séchoir ou tas).	9/7
Figure 3. Dans les situations défavorables aux espèces de graminées pouvant valoriser beaucoup d'azote, une fertilisation azotée élevée favorise la prolifération de plantes nitrophiles à tiges grossières (ici <i>Heracleum sphondylium</i> L.).	9/10
Figure 4. Illustration de l'effet de la fertilisation sur le rendement et les teneurs en N, P, K et Mg d'une prairie de fauche. Les résultats présentés ont été obtenus après 9 ans de fertilisation contrastée. Cet essai de fertilisation a été conduit sur une prairie permanente utilisée de manière intensive, dominée par du ray-grass d'Italie (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) et située à Hohenrain (610 m d'altitude, 1'100 mm de précipitations annuelles).	9/12

14. Annexe

Annexe au tableau 2. Teneurs en P_2O_5 et en K_2O dans les herbages de composition botanique équilibrée en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation (selon Agroscope 2015b, en considérant que le stade d'utilisation est retardé lorsque l'intensité d'utilisation diminue).

Mode et intensité d'utilisation	Teneurs en macro-éléments (kg/dt de matière sèche)			
	P_2O_5		K_2O	
	Ø ¹	Intervalle ²	Ø ¹	Intervalle ²
Prairie				
Intensive	0,82	0,71–0,96	3,6	3,0–4,1
Mi-intensive	0,76	0,64–0,89	3,3	2,8–3,7
Peu-intensive	0,64	0,53–0,78	2,5	2,0–3,1
Extensive	0,53	0,41–0,64	1,7	1,2–2,2
Pâturage				
Intensif	0,89	0,78–1,03	3,7	3,3–4,3
Mi-intensif	0,82	0,71–0,96	3,5	3,0–4,1
Peu-intensif	0,71	0,60–0,85	3,0	2,5–3,5
Extensif	0,62	0,50–0,76	2,4	1,9–2,9

¹ Valeurs moyennes pondérées par la part de rendement du 1^{er} cycle de végétation.

² Intervalles indiquant la fourchette de valeurs fréquemment mesurées.

