

Besoins en phosphore et en potassium d'une prairie de fauche du Jura riche en fétuque rouge

Bernard Jeangros et Sokrat Sinaj

Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

Renseignements: Bernard Jeangros, e-mail: bernard.jeangros@agroscope.admin.ch



La comparaison de différents procédés de fertilisation en phosphore et en potassium sur une prairie du Jura a suscité l'intérêt de nombreux visiteurs.

Introduction

La fertilisation des prairies permanentes doit être intégrée dans une stratégie de maintien à long terme d'une composition botanique équilibrée et permettre à l'agriculteur d'obtenir le fourrage souhaité sans porter atteinte à l'environnement (Huguenin-Elie *et al.* 2017). Si la fertilisation des prairies intensives de plaine a fait l'objet de nombreuses études, les besoins en éléments nutritifs des prairies de montagne exploitées de façon peu intensive sont moins bien connus. Les prairies riches en fétuque rouge et en agrostide capillaire entrent dans cette catégorie et sont largement répandues dans les régions de montagne, en particulier dans le Jura. Elles fournissent une partie des réserves de fourrage pour l'hiver et jouent aussi un rôle important pour la conservation de la biodiversité lorsqu'elles sont riches en espèces. Cette fonction ne doit pas être remise en cause par une fertilisation excessive.

L'essai mis en place en 1992 dans le Jura avait pour principal objectif de préciser les effets à long terme de différents apports de phosphore (P) et de potassium (K) sur la disponibilité de ces éléments dans le sol, sur la composition botanique de la prairie ainsi que sur la quantité de fourrage et ses teneurs en P et K. Une partie des résultats de cet essai ont déjà été repris dans des études visant à définir un indicateur pour optimiser les apports de P sur prairies (Jouany *et al.* 2013; Liebisch *et al.* 2013; Messiga *et al.* 2015). Cet article donne un aperçu de l'ensemble des résultats obtenus, lesquels ont par ailleurs contribué à la mise à jour des Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (Sinaj et Richner 2017); il précise les quantités de P et de K qui doivent être apportées à ce type de prairie pour concilier maintien de la composition botanique souhaitée, production fourragère adaptée au milieu et préservation de l'environnement.

Matériel et méthodes

Site expérimental

L'essai s'est déroulé de 1992 à 2006 dans le Jura sur l'alpage de La Petite Ronde, commune des Verrières (NE, 1100 m), sur une surface précédemment le plus souvent pâturée, mais parfois aussi fauchée. Dominée par la fétuque rouge (*Festuca rubra*) et l'agrostide capillaire (*Agrostis capillaris*), la végétation de cette prairie appartient à l'association *Festuco-Agrostietum*. Le sol est un cambisol acide (pH 5,5) et humifère (7 % de matière organique) présentant une texture de type limon-argileux (argile 29 %, limon 47 %, sable 24 %). Selon Flisch *et al.* (2017), le niveau de fertilité du sol en 1991 peut être qualifié de médiocre pour P (0,59 mg/kg, méthode CO₂) et K (11,5 mg/kg, méthode CO₂) et de satisfaisant pour Mg (95 mg/kg, méthode CaCl₂).

Selon Schreiber (1977), le climat à La Petite Ronde est rude. Les trois années d'observation détaillées de la production de fourrage (1997, 2001 et 2005) sont caractérisées par une température moyenne pendant la période de végétation proche de la moyenne plurian-

nuelle (12,6°C de mai à septembre). Du point de vue des précipitations, les années 1997 et 2001 sont légèrement plus humides (respectivement +35 et +68 mm) et l'année 2005 plus sèche (-148 mm) que la moyenne pluriannuelle (761 mm de mai à septembre).

Dispositif expérimental

L'essai complet comprend trois modes d'utilisation (procédé principal) et huit sous-procédés de fertilisation PK (tabl. 1) dans un dispositif en split-plot avec quatre répétitions (parcelles élémentaires de 10 m × 3 m). Dans cet article, seul le mode d'utilisation à deux coupes par année, qui correspond à une intensité d'exploitation peu intensive, est pris en compte. La première coupe a été réalisée début juillet, au stade fin épiaison – début floraison du dactyle, et la seconde à mi-septembre (reousse de 10 semaines). Les autres modes d'utilisation (quatre pâtures par année et quatre coupes par année) feront l'objet d'un second article.

P a été apporté chaque année sous forme de Granuphos 18 % (Landor) et K sous forme de sel de potasse (60 %). Des apports complémentaires de magnésium (Granumag, Landor) et de calcaire granulé (CaO) ont assuré des apports de magnésium (Mg) et de calcium (Ca) identiques dans tous les sous-procédés (tabl. 1). Tous ces engrais ont été apportés simultanément entre fin avril et début mai (sauf début juillet en 2001) à l'aide d'un semoir à graines de type Oyord (semoir Plotman Wintersteiger, Autriche) pour assurer une distribution homogène. 25 kg d'azote/ha/an (nitrate d'ammoniaque) ont été apportés chaque année après la 1^{re} coupe. Les dégâts de campagnols, surtout *Arvicola terrestris*, ont été maîtrisés grâce à une lutte régulière à l'aide de rodenticides.

Observations et mesures

Les caractéristiques du sol ont été mesurées sur des échantillons constitués d'une quinzaine de prélèvements par parcelle à une profondeur de 0 à 10 cm. Les prélèvements ont été effectués début octobre, après la dernière coupe, en 1991 (avant la mise en place de l'essai) et en 2005. Les teneurs du sol en P, K et Mg ont été évaluées selon les deux méthodes d'extraction recommandées en Suisse: extraction à l'eau saturée de CO₂ et à l'acétate d'ammonium EDTA (AA-EDTA) pour P et K, extraction avec une solution de CaCl₂ et à l'AA-EDTA pour Mg. La teneur en Ca a également été mesurée après extraction à l'AA-EDTA. Toutes ces méthodes sont décrites par Flisch *et al.* (2017).

La composition botanique de chaque parcelle a été observée au départ de l'essai (1992) et en 2006 selon la

Résumé

Les apports raisonnés de phosphore (P) et de potassium (K) sur une prairie visent à maintenir une composition botanique adéquate et à produire une quantité suffisante de fourrage sans porter atteinte à l'environnement. Huit niveaux de fertilisation P et K ont été appliqués pendant 13 ans sur une prairie permanente du Jura exploitée de façon peu intensive. Des apports croissants de P (entre 0 et 26 kg P/ha/an) et de K (entre 0 et 116 kg K/ha/an) ont permis d'améliorer la disponibilité de ces éléments dans le sol. La fertilisation PK a peu influencé la composition botanique, mais elle a eu un effet significatif et positif sur la quantité de fourrage à partir de la 10^e année. Les teneurs en P et K du fourrage ont nettement augmenté avec l'accroissement des apports de ces éléments. Sur la base de la teneur en P du sol, de la composition botanique, de la quantité de fourrage et de sa teneur en P, du bilan apports-exportations et de l'indice de nutrition PNI, un apport annuel entre 9 et 17 kg P/ha/an peut être considéré comme optimal pour ce type de prairie produisant environ 45 dt MS/ha/an. La dose optimale de K est plus difficile à cerner car elle varie beaucoup selon l'indicateur pris en compte.

méthode décrite par Daget & Poissonet (1971; 50 points par parcelle). Les relevés ont été effectués au cours de la 2^e quinzaine de mai, au stade montaison du dactyle. La quantité de fourrage et ses teneurs en éléments nutritifs ont été mesurées à chaque coupe et sur chaque parcelle en 1997, 2001 et 2005. Une bande centrale de 1,5 m de largeur et 6,8 m de longueur a été fauchée à l'aide d'une motofaucheuse (hauteur de coupe de 5 à 7 cm). Le fourrage vert a été pesé sur place et un échantillon d'environ 0,5 kg a été prélevé pour déterminer les teneurs en matière sèche (MS), P, K, N et Mg.

Analyse des données

Les teneurs annuelles en éléments nutritifs sont des moyennes pondérées par le rendement en MS de chaque coupe. Les quantités de P et K exportées annuellement avec le fourrage ont été calculées en multipliant, pour chaque coupe, la teneur en P ou en K par le rendement en MS, puis en additionnant les deux coupes.

Tableau 1 | Apports annuels d'éléments nutritifs dans les huit sous-procédés de fertilisation.

Sous-procédé	P (kg/ha/an)	K (kg/ha/an)	N (kg/ha/an)	Mg (kg/ha/an)	Ca (kg/ha/an)
0/0	0	0	25	18	80
9/0	9	0	25	18	80
9/29	9	29	25	18	80
9/58	9	58	25	18	80
17/29	17	29	25	18	80
17/58	17	58	25	18	80
17/87	17	87	25	18	80
26/116	26	116	25	18	80

Les indices de nutrition pour P (PNI) et K (KNI) ont été calculés, coupe par coupe, selon Duru et Théliier-Huché (1997). Un indice annuel moyen a été calculé en pondérant l'indice de chaque coupe par son rendement. L'apport en éléments nutritifs est considéré comme suffisant lorsque l'indice est compris entre 80 et 120, tandis qu'un indice inférieur à 80 indique une déficience et un indice supérieur à 120 une consommation de «lux».

Des analyses de variance à un facteur (fertilisation PK) ont été effectuées sur chaque variable mesurée, séparément pour chaque année d'observation. Lorsque l'effet de la fertilisation était significatif, les moyennes par sous-procédé ont été comparées deux par deux en se basant sur la plus petite différence significative (ppds). Toutes les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel R 3.3.3 (R Core Team 2017).

Résultats et discussion

Teneurs en macroéléments du sol

En 2005, treize ans après le début de l'essai, les teneurs du sol en P et K varient significativement selon les apports de P et K, quelle que soit la méthode d'extraction (tabl. 2). La teneur en $P_{AA-EDTA}$ est le paramètre qui réagit le plus à la fertilisation PK avec une valeur huit fois plus élevée dans le sous-procédé 26/116 que dans le sous-procédé 0/0. Des apports annuels de 9 kg P/ha maintiennent un état de fertilité médiocre, tandis que 17 kg P/ha permettent d'atteindre le niveau satisfaisant (Flisch *et al.* 2017). Malgré d'assez grandes variations des teneurs en K du sol selon la fertilisation PK, l'état de fertilité du sol en K en 2005 peut être qualifié de satisfaisant dans presque tous les sous-procédés avec les deux méthodes d'extraction, ceci même sans apport de K (Flisch *et al.* 2017).

Le pH et la teneur en Ca du sol diminuent légèrement avec l'augmentation des apports PK. Les différences de teneur en Mg du sol ne sont par contre pas significatives. La diminution de la teneur en Ca s'explique par des exportations plus importantes dans les sous-procédés les plus fertilisés en lien avec une plus grande production de fourrage (voir plus loin). La baisse du pH provoquée par l'augmentation des apports PK est probablement due à la diminution du Ca ainsi qu'à l'effet acidifiant des engrais apportés.

Tableau 2 | Effets de 13 ans de fertilisation PK sur les teneurs en P, K, Mg et Ca ainsi que sur le pH du sol sous une prairie du Jura fauchée deux fois par année (2005, horizon 0–10 cm). Pour une caractéristique donnée, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes.

Caractéristique du sol	$P_{AA-EDTA}$ mg/kg	P_{CO_2} mg/kg	$K_{AA-EDTA}$ mg/kg	K_{CO_2} mg/kg	$Mg_{AA-EDTA}$ mg/kg	Mg_{CaCl_2} mg/kg	$Ca_{AA-EDTA}$ mg/kg	pH
Valeur initiale (1991)	–	0,59	–	11,5	–	95	–	5,51
Fertilisation PK								
0/0	7,6 e	0,44 c	127 d	12,7 c	174 a	134 a	2328 b	5,55 ab
9/0	24,5 cde	0,61 abc	135 cd	14,3 c	181 a	137 a	2826 a	5,73 ab
9/29	18,5 cde	0,57 abc	145 cd	15,4 c	164 a	129 a	2460 abc	5,50 b
9/58	15,4 de	0,49 bc	159 c	16,0 c	162 a	128 a	2157 bc	5,48 b
17/29	37,1 bcd	0,69 ab	152 cd	15,4 c	175 a	136 a	2206 bc	5,43 bc
17/58	40,6 abc	0,62 abc	140 cd	12,5 c	170 a	124 a	2412 c	5,60 ab
17/87	53,2 ab	0,77 a	198 b	21,0 b	163 a	131 a	2144 bc	5,28 c
26/116	61,0 a	0,73 a	238 a	25,5 a	151 a	123 a	1923 c	5,28 c
Moyenne	32,2	0,62	162	16,6	167	130	2307	5,48
Valeur P	0,001	0,032	0,000	0,000	0,159	0,389	0,005	0,001
ppds	22,8	0,20	27	4,5	–	–	390	0,19

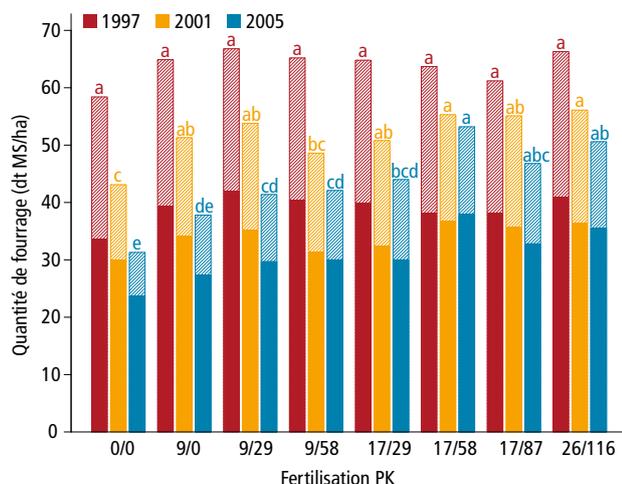


Figure 1 | Effets de la fertilisation PK sur la quantité de fourrage (dt MS/ha) produite en 1997, 2001 et 2005 par une prairie du Jura fauchée deux fois par année. Les barres pleines et hachurées indiquent les quantités de fourrage respectivement à la 1^{re} et à la 2^e coupe. Pour une année donnée, les quantités annuelles (somme des deux coupes) surmontées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes.

Composition botanique de la prairie

En 2005, 57 espèces ont été relevées sur l'ensemble des parcelles du procédé à deux coupes. Treize espèces figurent sur la clé du nord des Alpes pour l'évaluation de la qualité biologique des prairies peu intensives (OFAG 2014), les mieux représentées étant la flouze odorante (*Anthoxanthum odoratum*), la gesse des prés (*Lathyrus pratensis*), la crépide tendre (*Crepis mollis*), l'épervière petite laitue (*Hieracium lactucella*) et la marguerite (*Leucanthemum vulgare*). Chaque parcelle élémentaire de 30 m² héberge en moyenne 23,5 espèces dont seulement 3,4 sont des indicatrices de qualité biologique. Ces deux nombres n'ont pas été influencés de façon significative par la fertilisation PK. Quatorze ans d'apports PK différenciés n'ont pas non plus modifié la part des graminées, des légumineuses, des autres plantes et des principales espèces (tabl. 3). Seules trois espèces ont réagi significativement à la fertilisation PK. La part de véronique petit-chêne (*Veronica chamaedrys*) diminue avec l'augmentation des apports PK, alors que celle de trèfle blanc (*Trifolium repens*) augmente légèrement. La réaction de l'avoine jaunâtre (*Trisetum flavescens*) à la fertilisation PK est plus difficile à cerner car un seul sous-procédé (9/29) se distingue des sept autres.

Ce faible effet de la fertilisation P sur les légumineuses a aussi été observé par Philipp *et al.* (2004), mais il est contraire aux observations d'autres auteurs qui ont mis en évidence un effet positif de la fertilisation PK (Tho-

met et Koch 1993). Dans l'essai présenté ici, le développement des légumineuses a probablement été limité par d'autres facteurs défavorables, comme le climat rude par exemple.

Quantité de fourrage

La quantité de fourrage produite annuellement a progressivement diminué entre 1997 et 2005 (fig. 1). Des mesures faites chaque année uniquement sur la 1^{re} coupe (données non présentées), celle-ci fournissant environ 2/3 du rendement annuel en MS, confirment cette diminution. En effet, au-delà des fortes variations annuelles, la quantité de fourrage à la 1^{re} coupe a baissé en moyenne de 1,2 dt MS/ha par année entre 1993 et 2005. Par rapport à 1997 et 2001, le rendement plus faible obtenu en 2005 peut aussi s'expliquer en partie par des précipitations inférieures à la moyenne pluriannuelle cette année-là. Le rendement moyen obtenu en 2005 (43 dt MS/ha) correspond assez bien au rendement de référence indiqué par Huguenin-Elie *et al.* (2017) pour une prairie peu intensive à 1100 m d'altitude (45 dt MS/ha). La fertilisation PK a exercé un effet significatif et positif sur la quantité de fourrage produite en 2001 et en 2005, mais pas en 1997. L'écart de production annuelle entre le sous-procédé 0/0 et le sous-procédé 26/116 augmente

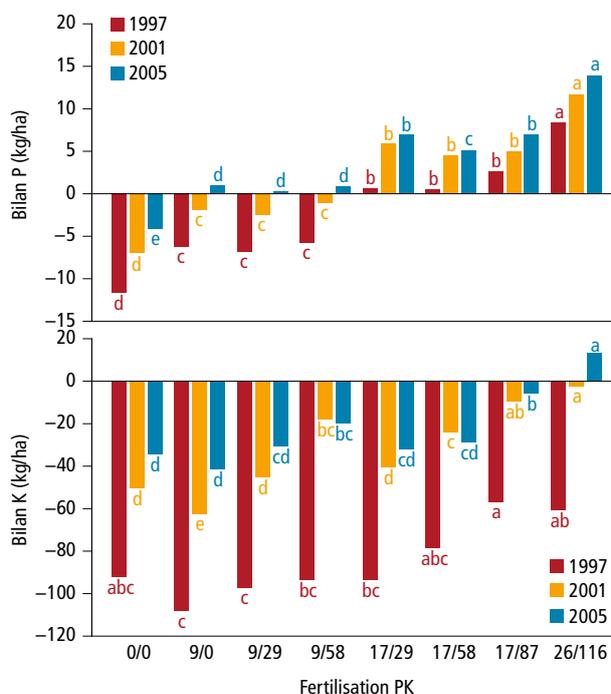


Figure 2 | Effets de la fertilisation PK sur le bilan (apports – exportations, kg/ha) en P et K en 1997, 2001 et 2005 pour une prairie du Jura fauchée deux fois par année. Pour une année donnée, les bilans avec une même lettre ne sont pas significativement différents.

Tableau 3 | Effets de 14 ans de fertilisation PK sur la composition botanique (contributions spécifiques, %) d'une prairie du Jura fauchée deux fois par année (2006). Pour un groupe ou une espèce donné, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes. Seules les espèces dont la contribution spécifique moyenne dépasse 2 % sont indiquées.

Groupes botaniques et principales espèces	%	Valeur initiale (1992)	Fertilisation PK							Moyenne	Valeur P	ppds	
			0/0	9/0	9/29	9/58	17/29	17/58	17/87				26/116
Graminées (G)	%	60,4	52,7 a	55,9 a	58,4 a	56,8 a	56,3 a	59,4 a	59,2 a	58,9 a	57,2	0,446	–
Légumineuses (L)	%	8,8	6,4 a	3,4 a	6,5 a	4,9 a	7,7 a	7,2 a	5,2 a	4,8 a	5,8	0,124	–
Autres plantes (A)	%	30,8	39,8 a	40,4 a	34,6 a	35,9 a	35,1 a	32,5 a	34,2 a	34,8 a	35,9	0,335	–
<i>Festuca rubra</i> (G)	%	18,3	27,9 a	30,3 a	29,5 a	30,8 a	28,6 a	30,7 a	30,5 a	30,7 a	29,9	0,453	–
<i>Agrostis capillaris</i> (G)	%	18,9	14,0 a	14,0 a	12,3 a	9,9 a	12,4 a	11,8 a	12,7 a	14,3 a	12,7	0,661	–
<i>Rumex acetosa</i> (K)	%	0,7	4,2 a	6,3 a	4,3 a	4,9 a	5,3 a	5,1 a	4,0 a	7,9 a	5,2	0,270	–
<i>Anthoxanthum odoratum</i> (G)	%	1,2	3,8 a	3,6 a	4,7 a	5,0 a	5,3 a	4,9 a	5,5 a	4,8 a	4,7	0,875	–
<i>Dactylis glomerata</i> (G)	%	9,6	3,2 a	4,2 a	4,1 a	5,3 a	4,8 a	5,3 a	5,7 a	4,4 a	4,6	0,679	–
<i>Ranunculus acris friesianus</i> (K)	%	3,4	4,6 a	5,6 a	3,5 a	5,8 a	5,6 a	2,6 a	4,3 a	4,5 a	4,5	0,498	–
<i>Veronica chamaedrys</i> (K)	%	2,8	5,8 ab	7,7 a	4,7 bc	3,0 bc	4,1 bc	2,5 c	3,2 bc	2,1 c	4,1	0,010	2,9
<i>Crocus albiflorus</i> (K)	%	3,3	4,8 a	3,8 a	3,9 a	3,5 a	4,1 a	3,5 a	5,0 a	4,4 a	4,1	0,859	–
<i>Veronica serpyllifolia</i> (K)	%	0,7	2,2 a	2,1 a	3,4 a	2,7 a	5,4 a	3,7 a	2,3 a	2,4 a	3,0	0,086	–
<i>Trisetum flavescens</i> (G)	%	1,2	2,0 b	2,3 b	5,4 a	2,4 b	2,1 b	3,0 b	1,7 b	2,9 b	2,7	0,037	2,1
<i>Lathyrus pratensis</i> (L)	%	2,1	2,4 a	2,7 a	3,3 a	2,4 a	3,2 a	3,5 a	2,0 a	1,6 a	2,6	0,477	–
<i>Cardamine pratensis</i> (K)	%	0,1	2,6 a	4,2 a	1,8 a	2,1 a	2,0 a	2,9 a	3,0 a	2,3 a	2,6	0,769	–
<i>Trifolium repens</i> (L)	%	4,9	1,1 cd	0,4 d	1,2 bcd	1,8 bcd	4,1 a	3,0 abc	2,3 abc	3,0 ab	2,1	0,011	1,9
<i>Ajuga reptans</i> (K)	%	0,3	3,3 a	2,7 a	1,9 a	2,6 a	1,2 a	2,2 a	1,5 a	1,4 a	2,1	0,323	–

nettement de 1997 à 2005: +14 % en 1997, +30 % en 2001 et +62 % en 2005. Cet écart a tendance à être un peu plus marqué à la 2^e coupe qu'à la 1^{re} coupe.

Teneurs en macroéléments du fourrage

En 2005, les teneurs en P et K du fourrage augmentent nettement avec l'augmentation de la fertilisation PK lors des deux coupes (tabl. 4). En moyenne annuelle, les teneurs en P et en K ont presque doublé entre les sous-procédés 0/0 et 26/116 (+82 %). La teneur en P de la 1^{re} coupe est plus faible que celle de la 2^e coupe. Le numéro de la coupe n'a par contre pas d'influence sur la teneur en K du fourrage, contrairement aux observations de Schlegel *et al.* (2016).

Globalement, les teneurs en P observées dans cet essai sont inférieures aux teneurs de référence indiquées par Daccord *et al.* (2017) pour une prairie équilibrée (type botanique E) fauchée la première fois au stade fin épiaison – début floraison du dactyle (stade 5–6: 2,7 g/kg MS) et la seconde fois 10 semaines plus tard (stade 5: 3,2 g/kg MS).

Les teneurs en K à la 1^{re} coupe dans les sous-procédés recevant 0 ou 29 kg K/ha sont nettement inférieures aux teneurs de référence indiquées par Daccord *et al.* (2017) pour une prairie équilibrée fauchée au stade 5–6 (21 g/kg MS). Avec un apport d'au moins 58 kg K/ha, les teneurs observées s'approchent de cette teneur de ré-

férence. Les teneurs en K de la 2^e coupe sont par contre toutes nettement inférieures à la teneur de référence pour une repousse âgée de dix semaines (25 g/kg MS). Pour P et pour K, la teneur du sol et la teneur du fourrage sont corrélées positivement: le coefficient de corrélation est un peu plus élevé pour P ($r=0,67$ avec la méthode CO₂ et $r=0,74$ avec la méthode AA-EDTA) que pour K (respectivement $r=0,56$ et $0,73$). En fait, la teneur en P du fourrage n'augmente guère à partir d'une teneur du sol en P_{CO₂} de 0,62 mg/kg ou en P_{AA-EDTA} d'environ 30 mg/kg. De même, la teneur en K du fourrage reste assez stable au-delà d'une teneur du sol en K_{CO₂} de 17 mg/kg ou en K_{AA-EDTA} d'environ 170 mg/kg.

La teneur en N du fourrage n'a pas réagi de façon significative à la fertilisation PK (tabl. 4). Les teneurs en Mg et Ca diminuent par contre avec l'augmentation de la fertilisation PK. Ceci s'explique par une augmentation des exportations en Mg et Ca dans les sous-procédés les plus fertilisés et, pour Mg, également par un fort antagonisme entre K et Mg. En effet, l'apport de K explique presque entièrement les variations de la teneur en Mg du fourrage ($r^2=0,96$).

Les teneurs en Mg du fourrage observées dans cet essai sont nettement plus élevées que les teneurs de référence données par Daccord *et al.* (2017) pour la première coupe (type E, stade 5–6: 1,3 g/kg MS) et pour la repousse (type E, 10 semaines: 1,9 g/kg MS).

Tableau 4 | Effets de 13 ans de fertilisation PK sur les teneurs en macroéléments du fourrage produit par une prairie du Jura fauchée deux fois par année (2005). Pour un élément donné, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes.

Macro-élément	P g/kg TS			K g/kg TS			N g/kg TS			Mg g/kg TS		
	1	2	1&2*	1	2	1&2*	1	2	1&2*	1	2	1&2*
Fertilisation PK												
0/0	1,26 d	1,54 e	1,33 e	11,4 e	10,4 e	11,1 e	15,5 a	20,2 a	16,6 a	2,54 a	2,89 b	2,63 ab
9/0	1,94 b	2,25 cd	2,03 c	11,2 e	10,7 e	11,1 e	16,0 a	20,4 a	17,2 a	2,51 ab	3,26 a	2,72 a
9/29	1,93 bc	2,26 cd	2,02 cd	15,1 d	13,2 d	14,5 d	16,3 a	20,3 a	17,4 a	2,41 ab	2,85 bc	2,53 ab
9/58	1,78 c	2,08 d	1,87 d	19,4 b	16,5 bc	18,5 b	15,5 a	20,1 a	16,8 a	1,97 de	2,49 d	2,12 d
17/29	2,23 a	2,72 ab	2,38 ab	14,3 d	13,4 d	13,9 d	16,0 a	20,5 a	17,5 a	2,26 bc	2,83 bc	2,45 bc
17/58	2,15 a	2,75 ab	2,32 ab	16,8 c	15,7 c	16,4 c	16,5 a	20,7 a	17,7 a	2,12 cd	2,55 cd	2,24 cd
17/87	2,15 a	2,50 bc	2,25 b	20,7 ab	17,9 ab	19,8 a	15,7 a	19,6 a	16,8 a	1,73 ef	2,12 e	1,85 e
26/116	2,24 a	2,84 a	2,41 a	21,1 a	18,4 a	20,3 a	15,8 a	19,4 a	16,8 a	1,63 f	2,15 e	1,79 e
Moyenne	1,96	2,37	2,08	16,2	14,5	15,7	15,9	20,1	17,1	2,15	2,64	2,29
Valeur P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,800	0,358	0,315	0,000	0,000	0,000
ppds	0,16	0,27	0,16	1,6	1,6	1,3	–	–	–	0,27	0,30	0,25

*Moyenne pondérée par le rendement en matière sèche de chaque coupe.

Bilans P et K

En raison de son effet à la fois sur la quantité de fourrage produite et sur ses teneurs, l'augmentation de la fertilisation PK provoque chaque année une hausse significative des exportations de P et K; en 2005, ces exportations sont trois fois plus élevées dans le sous-procédé 26/116 que dans le sous-procédé 0/0, aussi bien pour P (respectivement 12 et 4 kg P/ha/an) que pour K (respectivement 103 et 35 kg K/ha/an).

En 2001 et 2005, l'apport de 9 kg P/ha permet d'équilibrer les exportations de P par le fourrage (fig. 2). Le bilan P devient excédentaire avec un apport de 17 ou 26 kg P/ha. En 1997, le bilan K est négatif dans tous les sous-procédés de fertilisation (fig. 2). Ce déficit diminue nettement en 2001 et 2005 et devient à peu près équilibré avec un apport de 87 kg K/ha.

Le bilan apports-exportations permet d'expliquer en partie l'évolution de la teneur en $P_{AA-EDTA}$ dans le sol. En effet, cette teneur diminue légèrement lorsque le bilan est négatif, augmente légèrement lorsque le bilan est proche de 0 et croît considérablement lorsque le bilan est excédentaire. Cette relation est moins marquée pour la teneur du sol en P_{CO_2} et inexistante pour les teneurs du sol en K_{CO_2} et $K_{AA-EDTA}$. En effet, ces dernières ne diminuent dans aucun sous-procédé, même lorsque le bilan K est négatif année après année.

Indices de nutrition

L'augmentation de la fertilisation PK provoque une nette augmentation des indices de nutrition P (PNI) et K (KNI) (tabl. 5). En 1997 et 2001, l'indice PNI dépasse souvent

la valeur de 80 indiquant des apports de P suffisants; en 2005, seuls les sous-procédés recevant au moins 17 kg P/ha/an obtiennent un indice supérieur à 80. L'indice KNI est souvent inférieur à 80 indiquant une déficience en K; en 2005, un apport d'au moins 87 kg K/ha/an est nécessaire pour atteindre un indice KNI supérieur à 80. Dans cet essai, la mise en œuvre des indices de nutrition ne remplit pas les conditions requises pour une interprétation optimale des valeurs obtenues. En effet, il aurait fallu les mesurer sur du fourrage plus jeune, en pleine

Tableau 5 | Effets de la fertilisation PK sur les indices de nutrition P (PNI) et K (KNI) en 1997, 2001 et 2005 pour une prairie du Jura fauchée deux fois par année. Pour un indice et une année donnés, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes.

Indice	PNI*			KNI*		
	1997	2001	2005	1997	2001	2005
Fertilisation PK						
0/0	74 d	62 e	51 e	62 e	47 e	45 e
9/0	86 c	81 cd	77 c	66 de	50 e	44 e
9/29	90 bc	81 cd	77 cd	75 cd	56 d	58 d
9/58	85 c	79 d	72 d	93 b	63 c	75 b
17/29	99 a	89 b	90 ab	76 cd	56 d	56 d
17/58	101 a	90 b	87 b	85 bc	59 cd	65 c
17/87	94 ab	87 bc	87 b	95 b	71 b	80 ab
26/116	101 a	98 a	93 a	106 a	84 a	82 a
Moyenne	91	84	79	82	61	63
Valeur P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ppds	8	8	5	11	6	6

*Moyenne pondérée par le rendement en matière sèche de chaque coupe.

croissance, et de préférence uniquement sur les graminées comme le préconisent Liebisch *et al.* (2013) pour PNI. Néanmoins, les variations des indices PNI et KNI provoquées par les apports de P et K sont cohérentes. Le niveau des indices KNI est toutefois probablement trop bas. En 2001 et 2005, la grande majorité des indices KNI indique une déficience en K qui n'est pas confirmée par une faible teneur en K du sol.

Conclusions

Des apports croissants de P (de 0 à 26 kg/ha/an) et de K (de 0 à 116 kg/ha/an) ont permis d'améliorer la disponibilité de ces éléments dans le sol. Les deux méthodes d'extraction (CO₂ et AA-EDTA) différencient bien les sous-procédés de fertilisation.

La fertilisation PK a peu influencé la composition botanique de la prairie, mais elle a eu un effet positif sur la quantité de fourrage qui s'est accentué au cours des années.

Les teneurs en P et K du fourrage augmentent nettement avec la fertilisation PK, mais restent inférieures aux teneurs de référence du livre vert (Daccord *et al.* 2017).

Sur la base de l'évolution de la teneur en P du sol, de la composition botanique, de la quantité de fourrage et de sa teneur en P, du bilan apports – exportations et de l'indice de nutrition PNI, un apport annuel compris entre 9 et 17 kg P/ha/an peut être recommandé. Cette valeur correspond assez bien aux recommandations de Huguenin-Elie *et al.* (2017) pour une prairie peu intensive produisant environ 45 dt MS/ha/an.

La dose optimale de K a par contre beaucoup varié selon l'indicateur pris en compte, de 0 (teneur en K du sol) à 87 kg K/ha/an (bilan et indice KNI). En se basant sur la production de fourrage (quantité et teneur en K) et en accord avec les recommandations de Huguenin-Elie *et al.* (2017), un apport de 58 kg K/ha/an (70 kg K₂O) semble adéquat. ■

Remerciements

Nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de cet essai de longue durée, en particulier à Cédric Bertola, Luc Stévenin et Jakob Troxler. Merci également à Lucie Büchi pour la mise en valeur statistique des données ainsi qu'à Olivier Huguenin et Marco Meisser pour les améliorations apportées au manuscrit.

Bibliographie

- Daccord R., Wyss U., Kessler J., Arrigo Y., Rouel M., Lehmann J., Jeangros B. & Meisser M., 2017. Valeur nutritive des fourrages. Dans Apports alimentaires recommandés pour les ruminants (Livre vert), chapitre 13, éd. Agroscope, Posieux.
- Daget P. & Poissonet J., 1971. Une méthode d'analyse phytosociologique des prairies. *Ann. Agron.* 22 (1), 5–41.
- Duru M. & Thélier-Huché L., 1997. N and P-K status of herbage: use for diagnosis of grasslands. In: Inra (éd.), Diagnostic procedures for crop management. Les colloques de l'Inra, 125–138.
- Flisch R., Neuweiler R., Kuster T., Oberholzer H., Huguenin-Elie O. & Richner W., 2017. 2/Caractéristiques et analyses du sol. In: Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017) (Ed. S. Sinaj & W. Richner). *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6), Publication spéciale, 2/1–2/33.
- Huguenin-Elie O., Mosimann E., Schlegel P., Lüscher A., Kessler W. & Jeangros B., 2017. 9/Fertilisation des herbage. In: Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017) (Ed. S. Sinaj & W. Richner). *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6), Publication spéciale, 9/1–9/21.
- Jouany C., Bélanger G., Jeangros B., Morel C., Sinaj S., Stroia C. & Ziadi N., 2013. Evaluation of phosphorus nutrition index as a tool for p nutrition diagnosis in permanent grassland. In: 7th International Phosphorus Workshop. 9.9., Ed. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 1–1.
- 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.
- Messiga A., Ziadi N., Jouany C., Virkajärvi P., Suomela R., Sinaj S., Bélanger G., Stroia C. & Morel C., 2015. Soil test phosphorus and cumulative phosphorus budgets in fertilized grassland. *Ambio.* 44 (2), 252–262.
- OFAG, 2014. Instructions relatives à l'art. 59 et à l'annexe 4 de l'ordonnance sur les paiements directs (OPD). Prairies extensives, prairies peu intensives et surfaces à litière, du niveau de qualité II, 15 p. Accès: <http://www.bff-spb.ch/bases-legales/bases-legales-federales/>
- 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.
- R Core Team, 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- 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 stage. *Animal Feed Science Technology* 219, 226–233.
- Sinaj S. & Richner W., 2017. Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017). *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6), Publication spéciale, 276 p.
- Schreiber K.-F., 1977. Niveaux thermiques de la Suisse sur la base de relevés phénologiques effectués dans les années 1969–1973. Edité par le Département fédéral de justice et police, le délégué à l'Aménagement du territoire, 68 p. + 5 cartes au 1:200 000.
- Thomet P. & Koch B., 1993. Längerfristige Auswirkung von Düngung und Schnittregime auf eine Heumatte. *Landwirtschaft Schweiz Band* 6 (2), 107–114.

Riassunto**Fabbisogno di fosforo e potassio di un prato da sfalcio del Giura ricco di festuca rossa**

Con aggiunte equilibrate di fosforo (P) e di potassio (K) nei prati è possibile mantenere un'adeguata composizione botanica al fine di produrre una quantità sufficiente di foraggio senza danneggiare l'ambiente. Otto metodi di fertilizzazione con diversi tenori di P e K sono stati applicati per 13 anni su un prato permanente del Giura utilizzato in modo poco intensivo. Un apporto crescente di P (tra 0 e 26 kg P/ha/anno) e K (tra 0 e 116 kg K/ha/anno) ha permesso di migliorare la disponibilità di questi elementi nel suolo. La fertilizzazione con P e K ha influenzato in modo ridotto la composizione botanica, ma ha avuto un effetto significativo e positivo sulla produzione di foraggio a partire dal 10° anno. I tenori di P e di K nel foraggio sono aumentati nettamente con l'incremento degli apporti di questi due elementi. Sulla base del tenore di P del suolo, della composizione botanica, della quantità di foraggio e del suo tenore di P, del bilancio apporti-aspporti e dell'indice nutrizionale PNI, un'aggiunta annua tra 9 e 17 kg di P/ha/anno può essere considerata ottimale per questo tipo di prati che producono circa 45 dt MS/ha/anno. Il quantitativo ottimale di K è più difficile da determinare perché varia notevolmente a seconda dell'indicatore preso in considerazione.

Summary**Phosphorus and potassium requirements of a hay meadow of the Swiss Jura dominated by red fescue**

Phosphorus (P) and potassium (K) inputs on grassland aim to maintain an appropriate botanical composition and to produce sufficient quantities of forage without harming the environment. Over a 13-year period, eight different levels of P and K fertilisation were applied on a low-intensive permanent grassland in the Swiss Jura. Rising inputs of P (between 0 and 26 kg P/ha/year) and K (between 0 and 116 kg K/ha/year) improved the availability of these elements in the soil. PK fertilisation had little influence on the botanical composition, but a significant and positive effect on the quantity of forage from the tenth year onwards. P and K content of the forage increased substantially with increasing inputs of these two elements. Based on the soil P content, the botanical composition, the quantity of forage and its P content, the annual P balance (inputs-removal) and the P nutrition index (PNI), an annual input between 9 and 17 kg P/ha/year can be considered as optimal for this type of grassland producing around 45 dt DM/ha/year. The optimal dose of K is more difficult to determine, since it varies significantly depending on the indicator considered.

Key words: Swiss mountain meadow, fertilization, soil fertility, botanical composition, forage, nutrition index.