

Performance de cultures dérobées fourragères adaptées aux conditions sèches

Nicolas Cauda¹, Pierre Mariotte², Rainer Frick³, David Frund², Edwige Dereuder², Jocelyn Altermath⁴, Sébastien Dubois⁵, Massimiliano Probo²

¹Proconseil, 1510 Moudon, Suisse

²Agroscope, Systèmes Pastoraux, 1725 Posieux, Suisse

³Agroscope, Production fourragère et systèmes herbagers, 8046 Zurich, Suisse

⁴Fondation Rurale Interjurassienne, 2852 Courtételle, Suisse

⁵Agroscope, Chimie des aliments pour animaux, 1725 Posieux, Suisse

Renseignements: Massimiliano Probo, E-mail: massimiliano.probo@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs16-152> Date de publication: 6 novembre 2025



Figure 1 | Parcelle expérimentale avec les bandes de différentes cultures dérobées en pleine croissance.
(Photo: Massimiliano Probo, Agroscope).

Résumé

Le changement climatique pose un défi à la production fourragère lié à l'augmentation de la variabilité climatique. L'introduction de cultures dérobées tolérantes aux conditions sèches est considérée comme une stratégie d'adaptation. Cette étude compare une dérobée traditionnellement utilisée, l'avoine-poispolette (APP) à cinq autres dérobées: sorgho hybride avec trèfles annuels, herbe du Soudan, avoine rude avec trèfle incarnat, moha et millet perlé. L'essai a été mené pendant les étés 2021 et 2022, qui ont été caractérisés par des conditions météorologiques différentes. Le rendement en matière sèche différait entre les dérobées, mais pas entre les années.

Les dérobées sorgho hybride avec trèfles annuels et moha ont produit la biomasse la plus élevée. La valeur nutritive du fourrage différait selon les dérobées et les années, la teneur en matière azotée la plus élevée et les valeurs de fibres les plus faibles étant observées dans l'APP. Comme alternative à l'APP, l'association sorgho hybride avec trèfles s'est avérée plus adaptée à des conditions contrastées, fournissant un rendement et une qualité satisfaisants grâce à la bonne complémentarité entre le sorgho et les trèfles annuels.

Keywords: climate change, catch crops, forage production, drought, forage sorghum.

Introduction

Au cours des dernières décennies, l'Europe a connu une augmentation des épisodes météorologiques extrêmes, tels que de graves sécheresses alternant avec de fortes précipitations (Hänsel *et al.*, 2022). Les projections prévoient une augmentation de la fréquence des sécheresses, en particulier au printemps et en été (Spinoni *et al.*, 2018). De fortes précipitations plus fréquentes et une réduction globale des précipitations sont également attendues, entraînant une plus grande variabilité de la production fourragère, avec une réduction importante du rendement et de la valeur nutritive en été durant les périodes de sécheresse sévère (Mosimann *et al.*, 2017). L'amélioration de la production fourragère par l'introduction de cultures dérobées d'été est une stratégie potentielle d'adaptation au changement climatique (Lambert *et al.*, 2020). Les graminées fourragères C4, telles que l'herbe du Soudan et le moha, présentent une bonne résistance à la sécheresse et aux températures élevées et une productivité satisfaisante en tant que dérobées d'été (Lambert *et al.*, 2020). Ces plantes fourragères peuvent être cultivées en pur ou en association, les associations présentant généralement un rendement et une qualité supérieurs, ainsi qu'une production plus stable en raison de la complémentarité dans l'utilisation des ressources entre les espèces semées (Suter *et al.*, 2021). Cette étude a été réalisée au cours de deux étés climatiquement différents (2021 et 2022) dans le Jura suisse, où une culture de dérobée traditionnellement utilisée dans la région, l'avoine-pois-poisette (APP), a été comparée à cinq dérobées d'été tolérantes à la sécheresse: sorgho hybride avec trèfles annuels, herbe du Soudan, avoine rude avec trèfle incarnat, moha et millet perlé (fig. 1). Nous avons émis l'hypothèse que i) les mé-

langes pourraient fournir un rendement et une qualité fourragère plus élevés et plus stables que les cultures en pur, grâce à la complémentarité dans l'utilisation des ressources entre les différentes espèces et que ii) le rendement et la qualité fourragère des différentes dérobées pourraient s'exprimer différemment en fonction de conditions climatiques variables pendant les mois d'été.

Matériel et méthodes

Sites d'étude et conditions climatiques

L'étude a été menée sur trois exploitations du canton du Jura, situées à 400–500 mètres d'altitude sur les communes de Courrendlin, Fontenais et Grandfontaine. Les précipitations et les températures moyennes annuelles de la région sont respectivement de 961 mm et de 9,5 °C (données 1991–2020, moyenne des stations de Delémont et Fahy, MétéoSuisse, 2022) (fig. 2). Le climat pendant les étés 2021 et 2022 a été caractérisé en calculant l'indice d'aridité (IA). Cet indice correspond au rapport entre les précipitations mensuelles et l'évapotranspiration potentielle mensuelle. Celui-ci a été calculé avec l'équation de Thornthwaite grâce au package SPEI dans R (Vicente-Serrano *et al.*, 2010), en utilisant les températures moyennes mensuelles et la latitude du site. Les degrés-jours de croissance (DJC) ont été calculés en utilisant une base de 8 °C.

Procédés

Dans chaque exploitation, six dérobées d'été ont été semées en juillet 2021 et 2022 (tableau 1): 1) la première comme référence connue sous l'abréviation APP Avoine (*Avena sativa*) – Pois fourrager (*Pisum sativum*) – Poisette

Tableau 1 | Caractéristiques des procédés et densité de semis.

Procédés	Composantes (espèces et variétés)	Densité (g/are)	Densité de semis (kg/ha)
1) APP	Avoine fourragère	1000	175
	Pois fourrager	400	
	Poisette	350	
2) Sorgho hybride avec trèfles annuels	Sorgho hybride multicolore (<i>Sorghum bicolor</i> × <i>Sorghum sudanese</i>), variété Pacific Graze	200	45
	Trèfle d'Alexandrie	150	
	Trèfle de Perse	100	
3) Herbe du Soudan	Sorgho du Soudan multicolore, variété Piper	150	15
4) Avoine rude avec trèfle incarnat	Avoine rude, variété Cadence	640	80
	Trèfle incarnat	160	
5) Moha	Variété Rucerus	250	25
6) Millet perlé	Variété Alberto	250	25

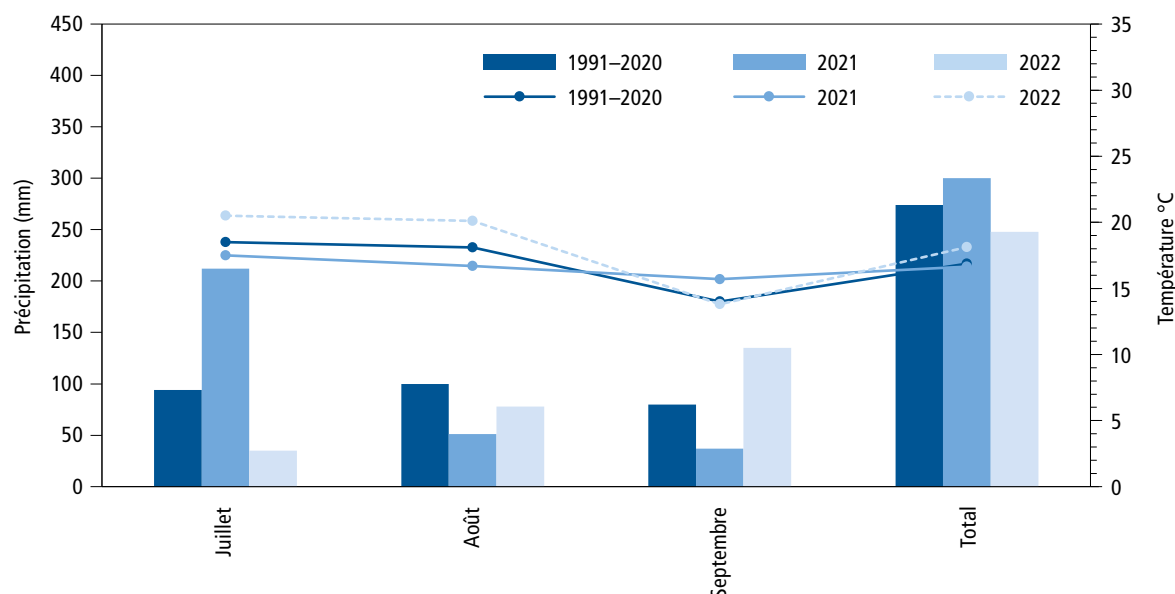


Figure 2 | Précipitations mensuelles cumulées (barres) et température moyenne (lignes) pendant les mois de juillet, août et septembre pour la série historique 1991–2020, et pour 2021 et 2022

(*Vicia sativa*) a été comparée à cinq autres dérobées estivales tolérantes à la sécheresse: 2) Sorgho hybride (*Sorghum bicolor* × *Sorghum sudanense*)–Trèfle de Perse (*Trifolium resupinatum*)–Trèfle d’Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*); 3) Herbe du Soudan (*Sorghum sudanense*); 4) Avoine rude (*Avena strigosa*)–Trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*); 5) Moha (*Setaria italica*) et 6) Millet perlé (*Pennisetum glaucum*). Les six dérobées ont été semées en bandes de 40–60 m x 5–6 m et de façon aléatoire au sein de trois répétitions (blocs) par site. Elles ont été semées après la récolte d’une orge et fauchées en début d’automne. À l’exception d’un site, les procédés ont été fertilisés avant le semis avec 25–35 m³ ha⁻¹ de lisier. En 2021, un apport de nitrate d’ammoniaque a été effectué après la levée (40 kg N/ha pour le sorgho en pur, 30 kg N/ha sur les autres procédés). En 2022, il a été décidé de renoncer à un apport d’azote en raison de la sécheresse.

Analyses du rendement et de la valeur nutritive

Les dérobées ont été récoltées entre le 8 et 11 octobre 2021 et entre le 15 et 22 septembre en 2022. Avant la récolte, un échantillon a été prélevé afin de déterminer la teneur en matière sèche (MS) et les paramètres chimiques: cendres (CE), matière azotée (MA), parois (NDF) et lignocellulose (ADF) selon les procédures décrites dans Svensk et al. (2024). Le rendement en MA a été calculé en multipliant le rendement en MS par la MA, et exprimé en Kg MA ha⁻¹. Les teneurs en sucres solubles dans l’eau ont été déterminées selon Hall et al.

(1999). La proportion de graminées et légumineuses dans les mélanges a été déterminée à l’aide de tri botanique de plusieurs prélèvements de fourrage collectés à différents endroits de chaque bande. Les effets interactifs des procédés et de l’année sur le rendement et la composition chimique ont été analysés à l’aide d’un modèle linéaire à effets mixtes, le «site» étant considéré comme un facteur aléatoire et les procédés, l’année et leur interaction comme des effets fixes, suivis de tests post-hoc de Tukey.

Résultats

Conditions climatiques

Les étés 2021 et 2022 ont montré des conditions contrastées (fig. 2). En effet, juillet 2021 a été caractérisé par de fortes précipitations jusqu’à 212 mm, supérieures aux précipitations moyennes de 93,5 mm pour ce mois, alors que juillet 2022 a connu une sécheresse sévère avec seulement 35 mm. Le mois d’août des deux années a été plus sec que la moyenne, tandis que le mois de septembre a été plus sec que la moyenne en 2021 et plus humide en 2022. Les températures moyennes en juillet-août étaient de 17,1 °C (2021) et 20,3 °C (2022), soit des écarts de –1,2 et +2 °C par rapport à la moyenne. La figure 3 montre l’indice d’aridité (IA), avec 0,65 comme valeur au-dessus de laquelle le climat passe de sec subhumide à humide. L’IA en juillet 2021 était dix fois plus élevé qu’en juillet 2022, tandis qu’en septembre, il était plus de trois fois plus élevé en 2022 qu’en 2021. En juillet et

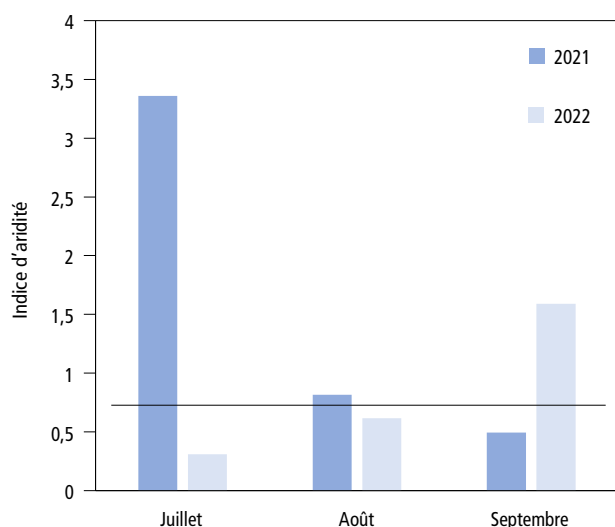


Figure 3 | Indice d'aridité pour les mois de juillet, août et septembre 2021 et 2022. La ligne noire horizontale indique un IA égal à 0,65, au-dessus duquel le climat passe de sec subhumide à humide.

août 2022 et en septembre 2021, l'IA était inférieur au seuil climatique de 0,65. Les degrés-jours de croissance (DJC) cumulés étaient de 615 en 2021 et de 829 en 2022.

Rendement fourrager

Le rendement en MS était significativement différent ($P < 0,05$) entre les différents procédés mais pas entre les années, et aucune interaction entre les procédés et l'année n'a été détectée (fig. 4). En moyenne, le moha (fig. 5) a montré le rendement en MS le plus élevé (29 ± 9 dt MS ha⁻¹), de même que le sorgho hybride avec trèfles annuels (29 ± 9 dt MS ha⁻¹) et l'APP (26 ± 5 dt MS ha⁻¹) (fig. 6). Les rendements en MS les plus faibles ont été observés pour le millet perlé (19 ± 4 dt MS ha⁻¹) et le mélange avoine rude avec trèfle incarnat (20 ± 4 dt MS ha⁻¹), qui différaient peu de l'herbe du Soudan (23 ± 7 dt MS ha⁻¹). En 2022, les conditions sèches ont favorisé des repousses d'orge du précédent cultural, qui représentaient en moyenne 26 % de la biomasse échantillonnée sur la base de la MS. En outre, le mélange APP était le plus riche en légumineuses (66 % de la biomasse en légumineuses) et la proportion moyenne de légumineuses était significativement plus élevée ($P < 0,05$) en 2021 qu'en 2022 (fig. 6).

Valeur nutritive

Tous les paramètres de composition chimique du fourrage différaient significativement ($P < 0,05$) entre les procédés et les années, avec une interaction significa-

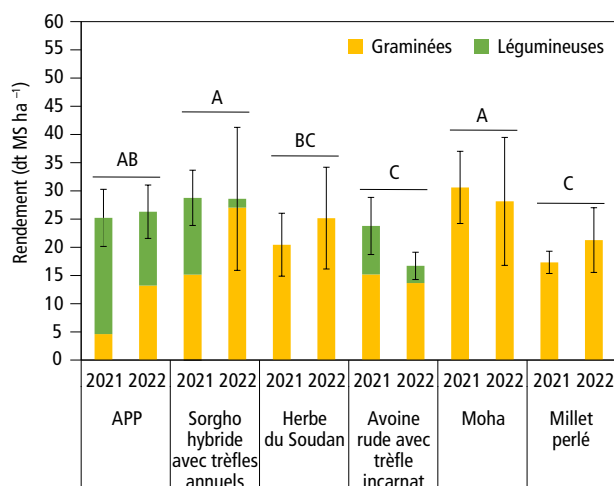


Figure 4 | Rendement des six dérobées testées au cours des deux années. Des lettres différentes indiquent des moyennes significativement différentes ($P < 0,05$). Pour les mélanges sorgho hybride avec trèfles annuels, avoine rude avec trèfle incarnat et APP, les couleurs remplissant les barres représentent la biomasse de graminées et légumineuses.

tive pour les teneurs en MA et en CE (tableau 2). L'APP a présenté les valeurs de MA les plus élevées, significativement plus élevées en 2021 ($204,5 \pm 14,7$ g/kg MS) qu'en 2022 ($139,9 \pm 40,4$ g/kg MS) ($P < 0,001$). Le moha a montré les teneurs les plus élevées en NDF tandis que les mélanges APP et sorgho hybride avec trèfles annuels ont montré les teneurs les plus basses. Le mélange avoine rude avec trèfle incarnat a montré les teneurs en sucres solubles les plus élevées, non significativement



Figure 5 | Le moha est une culture mono-coupe qui fournit un fourrage fibreux avec des teneurs faibles en énergie et en matière azotée. (Photo: Rainer Frick, Agroscope)

différentes de l'herbe du Soudan et du mélange sorgho hybride avec trèfles annuels. Le millet perlé et le moha présentaient les teneurs en CE les plus élevées.

Matière azotée à l'hectare

Le rendement en MA à l'hectare différait significativement entre les dérobées, mais pas entre les années (fig. 7). L'APP (442 Kg MA ha⁻¹) et le sorgho hybride avec trèfles annuels (417 Kg MA ha⁻¹) ont eu le rendement en MA le plus élevé par rapport aux autres procédés.

Discussion

Différences de rendement et valeur nutritive entre les dérobées

La première hypothèse n'a été que partiellement confirmée. La dérobée avec moha en pur et le mélange sorgho hybride avec trèfles annuels ont été les plus productifs, ne montrant pas de différences marquées avec le témoin APP. Une étude réalisée en Suisse occidentale a rapporté des valeurs de rendement similaires pour une culture d'APP (Mosimann *et al.*, 2017), mais des rendements plus faibles pour un sorgho hybride associé à du trèfle d'Alexandrie (18 dt MS ha⁻¹) et un moha associé à du trèfle d'Alexandrie (18 dt MS ha⁻¹). En France, Meslier *et al.* (2014) ont rapporté des rendements plus élevés pour une culture de millet perlé (48 dt MS ha⁻¹) et de

moha (56 dt MS ha⁻¹), cultivés en tant que dérobée d'été dans des conditions hydriques non limitées. Les dérobées avoine rude avec trèfle incarnat et millet perlé ont eu la production de biomasse la plus faible, avec des rendements de l'avoine rude avec trèfle incarnat comparables ou supérieurs à ceux rapportés dans le sud de l'Allemagne par Brust et Gerhards (2012) (18 dt MS ha⁻¹). Tous les paramètres de valeur nutritive du fourrage différaient de manière significative entre les dérobées. Les mélanges APP et sorgho hybride avec trèfles annuels ont présenté le rendement en MA le plus élevé. Le procédé moha a eu le rendement en MS le plus élevé, mais une qualité insatisfaisante en raison de la faible teneur en MA et de la teneur élevée en NDF. Les différences de qualité entre l'herbe du Soudan et le sorgho hybride avec trèfles annuels pourraient résulter de l'association du sorgho avec des légumineuses. En effet, le mélange sorgho hybride avec trèfles annuels a présenté un rendement en MS et une teneur en MA plus élevés, et des teneurs en NDF plus faibles que l'herbe du Soudan, en particulier en 2021 lorsque la biomasse des légumineuses atteignait en moyenne 50 % de la biomasse totale, contre 5 % en 2022. Le mélange témoin APP a montré un rendement en MS et une teneur en MA élevés, conservant une certaine stabilité d'une année sur l'autre et n'a pas été surpassé par les autres dérobées. Dans tous les cas, il faut tenir compte du fait que les résultats



Figure 6 | Sorgho hybride (variété Pacific Graze) en association avec des trèfles annuels. Ce mélange a montré des bons rendements ainsi qu'une bonne stabilité interannuelle, grâce à la complémentarité fonctionnelle entre espèces. (Photo: Edwige Dereuder, Agroscope)

Tableau 2 | Composition chimique des différentes dérobées au cours des deux années étudiées. L'écart-type est indiqué pour chaque valeur moyenne. Des lettres différentes indiquent des moyennes significativement différentes ($P < 0,05$). MA = matière azotée; NDF = parois; ADF = lignocellulose; CE = cendres.

Procédés	MA	NDF	ADF	Sucres solubles	CE
	(g/kg MS)				
APP (Avoine-Pois-Poisette)	172,2 ± 44,4 A	419,3 ± 60,6 D	256,6 ± 26,0 B	63,0 ± 14,1 BC	97,1 ± 18,0 C
Sorgho hybride avec trèfles annuels	145,5 ± 24,5 B	423,7 ± 47,6 CD	257,1 ± 24,5 B	64,7 ± 12,2 AB	106,2 ± 15,7 AB
Herbe du Soudan	118,4 ± 28,1 C	479,8 ± 53,0 B	276,2 ± 30,8 B	67,9 ± 17,9 AB	97,2 ± 19,9 BC
Avoine rude avec trèfle incarnat	127,8 ± 24,5 BC	460,9 ± 36,2 BC	260,2 ± 20,1 B	74,6 ± 18,9 A	93,1 ± 12,5 C
Moha	104,8 ± 16,2 C	540,0 ± 26,3 A	300,1 ± 17,8 A	42,6 ± 3,2 D	109,8 ± 10,6 A
Millet perlé	128,6 ± 29,4 BC	479,8 ± 38,9 B	268,5 ± 16,7 B	55,4 ± 15,5 CD	105,2 ± 17,7 A
Année					
2021	138,6 ± 38,1 A	453,0 ± 61,4 B	259,5 ± 25,8 B	59,9 ± 15,3 B	110,7 ± 13,4 A
2022	127,7 ± 33,0 B	480,1 ± 57,1 A	279,6 ± 25,7 A	63,1 ± 19,5 A	92,4 ± 14,7 B
Procédé *Année	$P < 0,001$	ns	ns	ns	$P = 0,04$

présentés sont influencés par une mauvaise levée des plantes due à l'humidité du sol en 2021 (Frick *et al.*, 2024) et l'importante biomasse des repousses d'orge de 2022.

Différences interannuelles liées aux conditions climatiques contrastées

La deuxième hypothèse a également été partiellement confirmée, car les rendements n'ont pas varié d'une année à l'autre, mais les paramètres de qualité des fourrages ont varié, probablement en raison des conditions climatiques contrastées. L'IA a en effet bien représenté le contraste interannuel de la disponibilité de l'eau, avec un début d'été humide et une fin d'été sèche en 2021 et la tendance inverse en 2022. La biomasse produite par les dérobées est positivement liée à la somme des températures. Cependant, malgré les 214 DJC supplémentaires accumulés en 2022 par rapport à 2021 (+ 35 %), essentiels pour obtenir une production de biomasse satisfaisante dans les cultures de fin de saison, le rendement en MS n'a pas augmenté, probablement en raison de la disponibilité limitée en eau qui a restreint la croissance des plantes et empêché les bénéfices d'une accumulation de chaleur plus importante. La qualité du fourrage a différé d'une année à l'autre, avec des taux de NDF, d'ADF et de sucres solubles plus élevés, mais des taux de MA et de CE plus faibles en 2022. En outre, les proportions de légumineuses étaient significativement plus élevées en 2021. En 2021, les mélanges comprenant de l'avoine ont été fortement attaqués par la rouille. En conséquence, le rendement de l'APP a été fortement pénalisé et la proportion de biomasse de ces graminées était plus faible dans les mélanges avoine rude avec trèfle incarnat et APP. En outre, la composition botanique du

sorgho hybride avec trèfles annuels a changé d'une année à l'autre. Alors que les mois de juillet et août 2021, plus frais, ont probablement ralenti le développement du sorgho hybride, permettant aux légumineuses d'atteindre en moyenne près de 50 % de la biomasse totale, les mêmes mois en 2022, plus chauds, ont favorisé l'établissement et le développement plus rapides du sorgho hybride, qui a fortement surpassé les légumineuses. Cela met en évidence le rôle des légumineuses dans la stabilisation de la production de biomasse et de la teneur en protéines dans des conditions climatiques contrastées. La plus faible teneur en CE en 2022 après la sécheresse correspond à une absorption réduite des minéraux ou à une moindre contamination par de la terre pendant les conditions sèches (Meisser *et al.*, 2013).

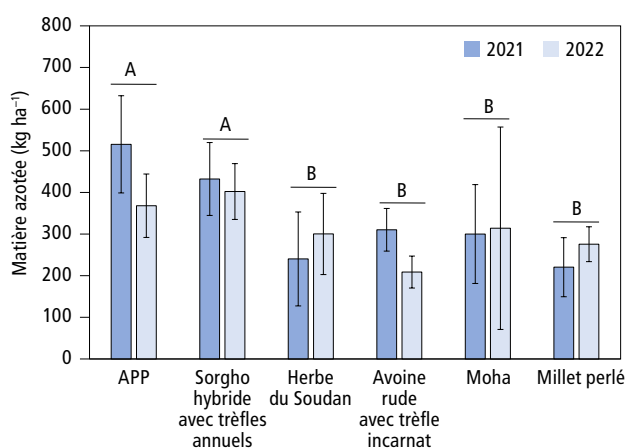


Figure 7 | Rendement en matière azotée (Kg MA ha⁻¹) des dérobées d'été testées en 2021 et 2022. Des lettres différentes indiquent des moyennes significativement différentes ($P < 0,05$).

Conclusions

L'adoption de dérobées tolérantes à la sécheresse offre une solution intéressante pour limiter les pénuries de fourrage causées par le changement climatique. Dans cette étude, les six dérobées testées ont maintenu un rendement stable en matière sèche dans des conditions climatiques contrastées. Les dérobées, telles que le moha et le sorgho hybride avec trèfles annuels, ont montré la production de biomasse la plus élevée. Cependant, la qualité du fourrage n'était pas toujours satisfaisante, le moha présentant une teneur élevée en fibres et une faible teneur en protéines. En revanche, le mélange sorgho hybride avec trèfles annuels et le mélange APP

couramment utilisé présentaient les rendements en matière azotée les plus élevés, ce qui souligne le rôle positif des légumineuses sur la teneur en protéines du fourrage et la production de biomasse complémentaire. ■

Remerciements

Nous tenons à remercier les familles Wüthrich, Daucourt et Quiquerez pour leur disponibilité et leur participation à l'essai, ainsi que Cédric Coudry, Nicolas Schiavi et Bastien Raymond pour leur aide sur le terrain. Cette étude a été financée par le projet Interreg V – Systèmes de Production Agricole Durables (SPAD) financé par le programme européen Interreg (projet n° 6125).

References

- Brust, J., & Gerhards, R. (2012). Lopsided oat (*Avena strigosa*) as a new summer annual cover crop for weed suppression in Central Europe. *Julius-Kühn-Archiv* 1(434): 257–264.
- Federal Office for Meteorology and Climatology (MeteoSwiss). (2022). Automatic measurement network. Available from: <https://www.meteoswiss.admin.ch/weather/measurement-systems/land-based-stations/automatic-measurement-network.html> [15.04.2023]
- Frick, R., Dereuder, E., Coudry, C., Raymond, B., Dubois, S., Mariotte, P., & Probo, M. (2024). Qualité fourragère et productivité de dérobées pour conditions sèches. *Revue Agronomique Suisse* 15: 191–198.
- Hall, M. B., Hoover, W. H., Jennings, J. P., Webster, T. K. M. (1999). A method for partitioning neutral detergent-soluble carbohydrates. *J. Sci. Food Agric.* 79(15): 2079–2086.
- Hänsel, S., Hoy, A., Brendel, C., & Maugeri, M. (2022). Record summers in Europe: Variations in drought and heavy precipitation during 1901–2018. *Int. J. Climatol.* 42(12): 6235–6257.
- Lambert, R., Van der Veeren, B., Decamps, C., Cremer, S., De Toffoli, M., & Javaux, M. (2020). Forage production and drought: developing solutions for Wallonia. *Fourrages* 244: 31–37.
- 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. *Recherche Agronomique Suisse* 4: 476–483.
- Meslier, E., Férard, A., Crocq, G., Protin, P. V., & Labreuche, J. (2014). Faire face à un déficit fourrager en valorisant des couverts végétaux de bonne valeur nutritive. *Fourrages* 218: 181–184.
- Mosimann, E., Bossuyt, N., Frund, D., Vuffray, Z., Bittar, A., Calanca, P., Meisser, M., Peguiron, D., Rufer, P., & Amaudruz, M. (2017). Préparation de la production fourragère au changement climatique. *Agroscope Science* 49:36.
- Spinoni, J., Vogt, J. V., Naumann, G., Barbosa, P., & Dosio, A. (2018). Will drought events become more frequent and severe in Europe? *Int. J. Climatol.* 38(4): 1718–1736.
- Suter, M., Huguenin-Elie, O., & Lüscher, A. (2021). Multispecies for multifunctions: combining four complementary species enhances multifunctionality of sown grassland. *Sci. Rep.* 11(1): 3835.
- Svensk, M., Mariotte, P., Terranova, M., Pittarello, M., Nota, G., Frund, D., Dubois, S., Manzocchi, E., Napoleone, F., Meese, S., & Lombardi, G. (2024). *Alnus viridis*: an encroaching species with valuable nutritional value reducing livestock greenhouse gas emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 364, p.108884. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108884>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.* 23(7): 1696–1718.