

LES CULTURES FOURRAGÈRES ESTIVALES : UNE RESSOURCE RELAIS DE NOS PRAIRIES EN ÉTÉ

Mise en situation

Le changement climatique impose de nouvelles solutions pour produire des fourrages en été, les pâtures classiques faisant souvent défaut en cette période. Des essais suivis sur quatre sites d'expérimentation en 2021 et 2022, ont confirmé l'adaptabilité des graminées fourragères estivales aux conditions extrêmes de plus en plus fréquentes.

Résumé

Avec les évolutions climatiques, la croissance de l'herbe débute précocement en sortie d'hiver et a tendance à se prolonger tardivement en automne. La période estivale tend à s'allonger, avec un déficit hydrique de plus en plus fréquent, impactant la production d'herbe et entraînant la distribution d'une partie des stocks fourragers pour répondre aux besoins des animaux. Se pose alors la question du maintien d'une production de biomasse pendant la saison chaude et sèche. Les graminées dites en C4, qui se différencient des graminées en C3 par leur métabolisme biologique, sont plus adaptées aux conditions estivales rencontrées car leur rendement photosynthétique est maintenu en présence de forte luminosité et de températures élevées. Les sorghos fourragers multicoupes, les millets, les mohas ou encore le teff grass font parties de ces graminées en C4, étudiées en réseau d'essais durant les étés de 2021 et 2022 dans le cadre du projet CAP PROTEINES. Malgré deux années climatiquement contrastées, la production de biomasse intra-variétale est restée stable. Nos résultats confirment l'intérêt des espèces végétales en C4 comme alternative aux prairies. D'autres espèces ont aussi fait l'objet d'essai : les légumineuses annuelles (trèfles et vesces) et tropicales (lablab et cowpea), cependant la contribution de ces légumineuses à la production de biomasse reste faible en association avec des graminées.

Summary

As a result of climatic changes, grass growth starts early in the winter and tends to extend into autumn. The summer period tends to lengthen, which, in the absence of grass production, means that part of the forage stocks must be distributed to meet the animals' needs. This raises the question of maintaining biomass production during the hot, dry season. The so-called C4 grasses, which differ from C3 grasses in their biological metabolism, are better adapted to summer conditions, as their photosynthetic yield is maintained in the presence of high light levels and high temperatures. Multi-crop forage sorghums, millets, mohas and teff grass (all in C4), were studied in a trails network during the summers 2021 and 2022 of the CAP PROTEINS project. Despite two climatically contrasted years, intra-variety biomass production remained stable. These results confirm the interest of these C4 plant species as an alternative to grasslands. Other species were also tested included annual (clovers and vetches) and tropical legumes (lablab and cowpea), however, the contribution of these legumes to biomass production remains low in association with grasses.

Auteurs

Gigot Carole¹, Duchene David², Morand Elodie³, Douine Claire⁴, Pierre Patrice⁵, Uijtewaal Anthony⁶

1. ARVALIS – FERME EXPÉRIMENTALE DES BORDES 36120 JEU LES BOIS

2. INRAE – UE 1297, UNITÉ EXPÉRIMENTALE PHYSIOLOGIQUE ANIMALE DE L'ORFRASIÈRE 37380 NOUZILLY

3. ARVALIS – STATION EXPÉRIMENTALE DE LA JAILLIÈRE 44370 LOIREAUXENCE

4. CIIRPO – FERME EXPÉRIMENTALE DU MOURIER 87800 SAINT PRIEST LIGOURE

5. IDELE – 42 RUE GEORGES MOREL – CS 60057 49071 BEAUCOUZE

6. ARVALIS – 29 RUE DE FORESTE 02590 VILLERS SAINT CHRISTOPHE

Auteur correspondant :

CAROLE.GIGOT@arvalis.fr

Mots clés

Culture d'été – changement climatique – adaptation – autonomie protéique

Key words

Summer crop – climate change – adaptation – protein autonomy

Références de l'article

Gigot C., Duchene D., Morand E., Douine C., Pierre P., Uijtewaal A. (2025). Les cultures fourragères estivales : une ressource relais de nos prairies en été, *Fourrages* 262, Pages 13-23.

Article accepté pour publication le 16 juin 2025

1-Introduction

En France, l'autonomie protéique des élevages de ruminants est en moyenne de 75% (Pavie & Le Gall, 2022). L'herbe sous toutes ses formes (pâturée, conservée) constitue la principale source de protéines des élevages de ruminants (51 à 84% selon les systèmes). Le complément est apporté aujourd'hui par des protéines exogènes à l'exploitation via des tourteaux (soja, tournesol, colza...) majoritairement d'origine étrangère (Etats-Unis, Brésil, Argentine) (Sailey *et al.*, 2022).

Par ailleurs, les systèmes d'élevages sont confrontés à de fortes fluctuations interannuelles de production de la ressource fourragère amplifiées par le changement climatique. En effet, la température moyenne s'est accrue de 1,6°C entre 1901 et 2018 et les vagues de chaleur estivales sont de plus en plus fréquentes et plus marquées (Planton, 2020). Ces conditions climatiques limitent la production de ressources herbagères en période estivale. De plus, d'après les projections climatiques suivant les cinq scénarios SSP du GIEC, ce constat ne devrait que s'amplifier, même selon les scénarios les plus optimistes (SSP1-1,9 et SSPP1-2,6) qui donnent une probabilité supérieure à 50% d'une augmentation des températures de +1,5°C et +2°C respectivement par rapport à la période 1850-1900, soit environ +1°C par rapport à nos jours. Pour le scénario le plus pessimiste (SSP5-8.5) consistant à ne pas agir, cette élévation de la température monterait même jusqu'à plus de 4°C supplémentaires par rapport à la même période soit +3°C par rapport à nos jours (Sédillot, 2023).

Dans ce contexte, l'implantation d'intercultures d'été, exploitables par la récolte ou le pâturage, représente un levier pour constituer une ressource fourragère supplémentaire. Les sorghos multicoupes (*Sorghum*), le moha (*Setaria italica*), le millet perlé (*Pennisetum glaucum*) et le teff grass (*Eragrostis tef*) figurent parmi les espèces adaptées. Appelées cultures dérobées (Legendre, 2018), quand elles sont semées après la moisson d'une céréale d'hiver, elles peuvent également être implantées plus précocement, c'est-à-dire lors de la dernière quinzaine de mai, à la suite d'une prairie en fin de vie ou d'une dérobée d'hiver récoltée précocement. Nous les dénommerons alors Cultures Fourragères Estivales (CFE) dans la suite de cet article.

Ces graminées sont dites « en C4 » compte tenu de leur mécanisme de photosynthèse qui se différencie des plantes dites « en C3 » par le mode de fixation du dioxyde de carbone (Hatch & Slack, 1970). Cela leur permet d'avoir un meilleur rendement photosynthétique, notamment en présence de luminosité et de températures élevées. Cette différence confère un avantage aux plantes en C4 sur la période estivale.

Les CFE ont déjà fait l'objet d'expérimentation notamment en région Centre-Val de Loire dans le cadre des projets DEROTAL¹ et DEROB² financés par la région Centre et pilotés respectivement

par le site INRAE de Nouzilly (37) et La Ferme Expérimentale des Bordes (36) (Hernandez, 2021).

Le projet DEROTAL, a permis d'identifier l'intérêt de la culture de teff grass au cours d'une alternance fauche et pâturage sur le maintien de l'état corporel de brebis en période estivale. En effet, pour cette culture, un stock sous forme d'enrubané réalisé au 21 juillet 2020 pour un rendement de 2.5 tonnes de matière sèche à l'hectare (tMS/ha) a permis d'atteindre l'autonomie fourragère pour un lot de trente brebis ayant pâturé les repousses jusqu'au 30 septembre 2020 avec un chargement de 13 brebis à l'hectare. Cependant, il a été nécessaire d'adapter la conduite au pâturage de cette espèce en mettant en place un pâturage tournant, afin d'optimiser la repousse et limiter les refus à l'épiaison. Un topping (fauche laissée au sol pour la consommation des animaux) a donc été réalisé lorsque le teff grass était épié, notamment pendant la période la plus sèche de l'année, afin de le rendre plus appétent pour les animaux. Par ailleurs, les brebis de ce lot ont montré les meilleures performances zootechniques par rapport aux brebis pâturant sur une prairie temporaire (fétuque élevée et dactyle) et celles dans la parcelle contenant du lablab mélangé avec du cowpea. Ce résultat est probablement à mettre en lien avec la bonne valeur alimentaire du teff grass. Cette espèce présentait notamment une teneur de 23.1 % de matière azotée totale (MAT) au 15 juillet 2020, comparé à une teneur de 9.8 % de MAT pour un mélange prairial fétuque/dactyle et de 18.6 % de MAT pour le mélange de moha, lablab et cowpea (Duchene *et al.*, 2022). Par ailleurs, en 2020, les sorghos multicoupes étudiés ont rivalisé avec le maïs en termes de productivité, posant alors la question de la substitution de la culture de maïs par un sorgho multicoupe ayant l'intérêt de pouvoir être valorisé par la récolte ou bien par le pâturage. Dans le cadre du projet DEROB, un large panel d'espèces et d'associations de graminées et de légumineuses estivales avait été observé en 2019 et 2020. Ces démonstrations, mises en place sur un seul site, n'avaient pas permis de démontrer un réel intérêt à l'association de graminées d'été avec des légumineuses, illustrant une très faible contribution au rendement de ces dernières (Gigot, 2021).

Le projet CAP PROTEINES, financé par le plan de relance, a étudié le potentiel des CFE à alimenter les ruminants l'été et ainsi limiter l'utilisation des stocks fourragers. Un réseau national d'essais a été mis en place en 2021 et 2022 avec deux types de plateformes expérimentales. Cet article présentera leurs différences et mettra l'accent sur les résultats des plateformes d'acquisition.

1 DEROTAL : DERObées estivales en Région Centre - VAL de Loire - projet financé par la Région Centre - Val de Loire - Site expérimental INRAE Nouzilly (37) 2019-2020.

2 DEROB : Nouvelles légumineuses et cultures fourragères estivales - projet financé par la Région Centre - Val de Loire - Site expérimental Ferme Expérimentale des Bordes (36) 2019-2020.

2-Matériels et méthodes

2.1-Un réseau d'essais à deux objectifs

Le projet CAP PROTEINES a permis de mettre en place un réseau d'essais constitué de 12 sites dont 4 plateformes dites d'acquisition et 8 plateformes dites de démonstration (Figure 1).

Les plateformes d'acquisition ont permis un suivi détaillé de l'évolution de la valeur alimentaire tout au long des cycles de production (du semis à la première coupe puis de la première coupe à la seconde) pour combler le manque de connaissances sur les sorghos multicoups (*Sorghum*), le moha (*Setaria italica*), le millet perlé (*Pennisetum glaucum*) et le teff grass (*Eragrostis tef*). L'objectif était d'établir des références sur leurs valeurs alimentaires à différents stades de croissance et sur les repousses.

Des dispositifs en blocs randomisés avec trois répétitions ont été mis en place. Dans chaque bloc, les espèces étudiées ont été répétées en trois microparcelles. Cela a permis de réaliser des prélèvements destructifs à différents stades au cours du premier cycle, notamment : épi à 10 cm du plateau de tallage (E10), dernière feuille étalée (DFE), épiaison (EPI) et floraison (FLO) ; sans endommager les parcelles de référence pour le rendement. Les prélèvements ont également été effectués sur les repousses à 4 (R+4), 6 (R+6) et 8 (R+8) semaines après la première récolte. Cette approche a permis de déterminer à la fois le potentiel de

production et la cinétique de valeur alimentaire, sur plusieurs cycles végétatifs. L'autre objectif de ce réseau d'essais a été de déterminer l'intérêt d'associer des légumineuses aux graminées expérimentées en période estivale afin d'avoir un gain en termes de MAT notamment. Les plateformes de démonstration ont permis de répondre à cette question grâce à un dispositif en damier croisant les espèces de graminées aux espèces de légumineuses et permettant alors d'étudier l'ensemble des associations graminées - légumineuses possibles.

2.2-Les espèces et variétés étudiées

Plusieurs espèces de CFE de la famille des graminées ont été étudiées afin de comparer leur potentiel. Parmi ces espèces, on retrouve le sorgho fourrager multicoupe représenté par plusieurs variétés afin d'étudier le large panel de type de sorgho disponible : hybride (*Sudan grass* x *Bicolor*) ou non (*Sudan grass* x *Sudan grass*), BMR (*brown mid rib*) ou non, *Photo Period Sensitive* (PPS). Le millet perlé BMR ou non, le moha ainsi que le teff grass ont également été expérimentés. Le millet perlé ayant été décevant en première année de suivi, il a été décidé d'étudier une deuxième variété en 2022 afin de déterminer s'il s'agissait d'un effet de l'année climatique ou bien d'un effet variété. Par conséquent pour la variété ADR 300, nous n'avons qu'une seule année de résultats. Le teff grass (*Eragrostis tef*) est une plante originaire d'Afrique où elle est cultivée en particulier pour sa production grainière.



Figure 1 : Localisation des essais du réseau mis en place en 2021 et 2022 avec en vert les sites d'acquisition et en violet les sites de démonstration.
 Figure 1: Location of the network trials set up in 2021 and 2022, in green, the acquisition sites and in purple, the demonstration sites.

Rarement étudiée en tant que fourrage, elle est pourtant reconnue pour sa capacité à produire de la biomasse en saison chaude (Miller, 2009).

2.3-Mise en place, notations et mesures effectuées

En 2021 et 2022, l'ensemble des plateformes d'essai a été implanté entre le 15 mai et le 9 juin, s'inscrivant alors dans une rotation après une prairie en fin de vie ou derrière une dérobée d'hiver.

Une analyse de sol a été réalisée sur tous les sites (à l'exception de la deuxième année sur le site de la Ferme du Mourier – CIIRPO). Cette étape a permis d'apporter les éléments nécessaires pour combler les éventuelles carences. Ainsi, les conditions non limitantes étaient réunies pour se concentrer uniquement sur l'impact des conditions climatiques. La fertilisation azotée a été ajustée en fonction du précédent cultural et de sa restitution, soit des apports variant de 60 à 100 kg N/ha selon les sites. L'ensemble des fertilisants ont été apportés avant le semis (tableau 1).

Les doses de semis appliquées ont été discutées avec les semenciers pour l'essai et sont décrites dans le tableau 2. Un rappui systématique post-semis a été effectué à l'aide d'un rouleau.

Pour les plateformes d'acquisition, à chacun des stades listés précédemment, un prélèvement sur une surface élémentaire de 2 rangs contigus sur 50 cm de long a été réalisé dans chaque bloc du dispositif pour l'ensemble des espèces. L'échantillon alors prélevé a été scindé en deux : un échantillon étuvé à 80°C pendant 48 heures afin de déterminer le taux de matière sèche et un second échantillon étuvé à 60°C pendant 72 heures avant d'être envoyé à l'analyse en laboratoire pour déterminer les valeurs alimentaires. La récolte de la microparcelle entière a été déclenchée pour l'ensemble des plantes lorsque l'espèce la plus précoce atteignait le stade début épiaison ou lorsque la hauteur de végétation atteignait 1,5m. À ce moment-là, 2 échantillons ont été prélevés par microparcelle et ont subi le même traitement que les prélèvements aux différents stades végétatifs. La récolte du deuxième cycle a été déclenchée 7 semaines après le premier cycle.

Pour les plateformes de démonstration, aucun prélèvement en cours de cycle n'a été effectué. Les seuils de déclenchement des récoltes ont été les mêmes que les plateformes d'acquisition. Lors de la récolte, les microparcelles en culture pure ont été entièrement fauchées, tandis que les associations n'étaient prélevées par quadrat de 0,25 m², uniquement si la légumineuse était présente.

Tableau 1 : Conditions pédoclimatiques de chaque essai d'acquisition mis en place en 2021 et 2022 et fertilisation appliquée.

Les conditions pédologiques sont représentées par les informations de type de sol, de pH et de teneurs en éléments fertilisant dans le sol. Les conditions climatiques sont représentées par la quantité de précipitation (P), d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de bilan hydrique simplifié (P-ETP) pour chaque essai et chaque année sur la période du 1er mai au 30 septembre.

Table 1: Pedoclimatic conditions of each acquisition trial implemented in 2021 and 2022 and fertilization applied.

Soil conditions are represented by information on soil type, pH and fertilizing element content in the soil. Climatic conditions are represented by the amount of precipitation, potential evapotranspiration and simplified water balance for each trial and each year over the period from May 1 to September 30.

Site d'essai	Année	Analyse de sol – état initial				Fertilisation			Conditions climatiques du 01/05 au 30/09		
		Type de sol	pH	Teneur en P205 Olsen (ppm)	Teneur en K2O échangeable (ppm)	kgN/ha	kgP2O5/ha	kgK2O/ha	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)
Ferme Expérimentale des Bordes (36)	2021	Sable argilo-limoneux	6.1	51	188	80 (ammonitrate 33.5)	60	90	424	535	-111
	2022		6.7	36	294	60 (ammonitrate 33.5)	50	50	263	731	-468
INRAE site de Nouzilly (37)	2021	Limon	6.7	71	304	90 (solution azotée N39)	0	0	436	479	-43
	2022		6.4	68	224	90 (solution azotée N39)	0	0	207	570	-363
Ferme des Bouviers – CIIRBEEF (56)	2021	Limons argileux sur schistes	6.2	110	440	38t/ha de fumier de bovins			392	491	-99
	2022		5.6	80	320	0	0	0	250	616	-366
Ferme du Mourier – CIIRPO (87)	2021	Sable argileux	6.4	94	98	100 (ammonitrate 33.5)	85	170	446	508	-62
	2022					NA					

Tableau 2 : Poids de mille grains (PMG), densité et profondeur de semis et prix indicatif d'achat de semence pour les espèces étudiées.
Table 2: Thousand-seed weight, sowing density and depth and indicative purchase price of seed for the species studied.

Espèce		PMG indicatif (g)	Densité semis (kg/ha)		Profondeur semis (cm)	Prix semence (€HT/kg)
			En pure	En association		
Sorgho multicoupe	Sudan non BMR	14.0	25	10	2	2.30-5.50
	Sudan BMR	13.3				
	Hybride non BMR	27.0				
	Hybride BMR	16.8				
	PPS	26.4				
Moha		2.5	25	10	2	1.80
Millet perlé	Non BMR (que 2022)	6.4	20	8	2	5.00
	BMR	7.9				
Teff grass		0.4	10	4	0.5	7.20
Lablab		240.0	56	28	2-3	5.00
Cowpea		61.7	44	22	2-3	5.70
Vesce commune de printemps		60.0	56	28	2-3	
Vesce velue		40.0	38	18	2-3	
Trèfle d'Alexandrie		2.8	25	12	1-2	6.80
Trèfle Squarrosus		4.9	31	16	1-2	7.50
Trèfle de Perse		1.4	34	17	1-2	8.50

Un tri était alors réalisé pour séparer les graminées, les légumineuses et les adventices, avant un séchage à 80°C pendant 48 heures afin d'évaluer la contribution de chaque espèce au rendement.

2.4-Méthode d'analyse

Pour l'analyse statistique, les plateformes d'acquisition et les plateformes de démonstration ont été analysées séparément. Seules les plateformes d'acquisition ont fait l'objet d'une analyse statistique pour les variables de rendement de chaque récolte de la microparcelle entière et les valeurs alimentaires de chaque prélèvement. Les dispositifs étant des blocs randomisés, le modèle utilisé est un modèle linéaire mixte avec comme seul effet fixe celui de l'espèce. Le seuil de significativité a été fixé à 5%.

L'analyse des valeurs alimentaires a été réalisée par le laboratoire GERM-Services. Dans le cadre de ce projet, compte tenu des faibles références pour déterminer par analyse en proche infrarouge les valeurs nutritives des espèces étudiées, l'ensemble des analyses ont été effectuées chimiquement grâce aux méthodes de référence pour les fourrages atypiques (Germ Services, 2016).

3-Résultats

3.1-Des rendements équivalents entre les deux années climatiques 2021 et 2022

L'analyse en réseau des quatre plateformes d'acquisition sur les deux années d'expérimentation (figure 2) montre une perte de rendement de moins de 1 tonne de matière sèche par

hectare (t MS/ha) en 2022 par rapport à 2021. La comparaison de la productivité annuelle d'une même modalité entre 2021 et 2022 ne montre pas de différence significative ($p=0,83$) (tableau 3).

Parmi l'ensemble des graminées étudiées, on observe une différence significative de productivité annuelle (somme de deux cycles de production) ($p=0,004$). Les sorghos fourragers multicoupe, à l'exception du PPS, sont dans le groupe de tête avec un rendement ajusté d'environ 10 t MS/ha en deux coupes (figure 2). Les autres espèces semblent un peu moins productives et font en moyenne 7,7 t MS/ha.

Dans le cadre du projet CAP PROTEINES, la recherche de l'autonomie protéique était un objectif. Nous avons donc souhaité comparer la production de MAT à l'hectare d'une part. D'autre part, compte tenu du fait que nous avons réalisé deux cycles, l'utilisation de l'unité kg de MAT/ha est la plus simple à comparer à l'échelle de l'année. Pour cela, nous avons pour chaque cycle multiplié la teneur (MAT en % MS) par le rendement et sommé le résultat des deux cycles. La production annuelle de kg de MAT à l'hectare s'échelonne de 850 à 1150 kg de MAT/ha selon les espèces (figure 2). Les teneurs en MAT sont en moyenne de 13 % sur la première coupe et de 10 % sur la seconde avec de meilleurs taux en 2022 par rapport à 2021. Les millets perlés et le teff grass présentaient les meilleurs taux de MAT par coupe. Malgré des rendements plutôt faibles pour ces espèces, l'indicateur utilisé de la production de kg de MAT/ha qui tient compte de la teneur en MAT et du rendement en t MS/ha, montre des valeurs assez proches.

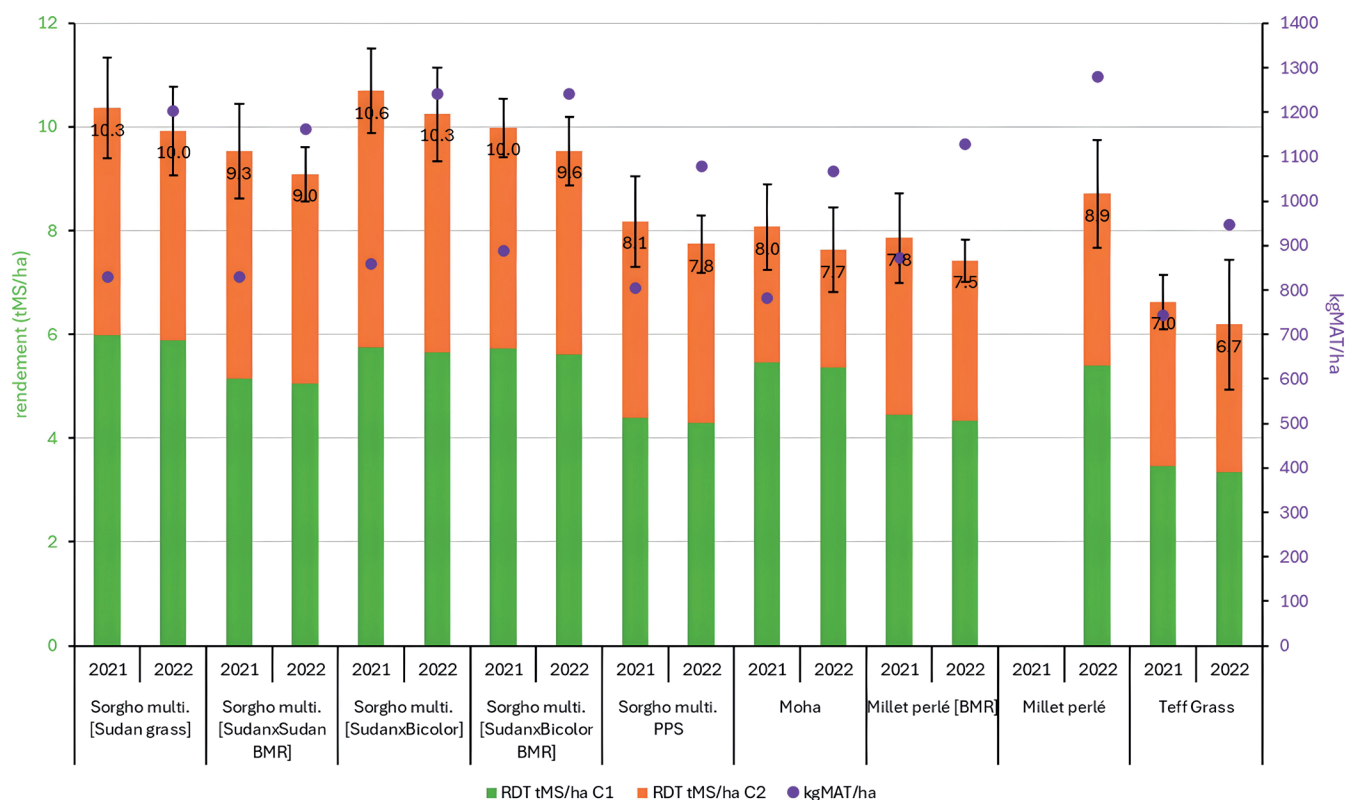


Figure 2 : Rendements moyens annuels (avec écart type résiduel et étiquette de valeur) des quatre essais sur deux coupes et Matière Azotée Totale rapportée en quantité produite à l'hectare pour les espèces multicoupes

Figure 2: Mean annual yields (with residual standard deviation and value label) of the four trials on two cuts and Total Nitrogen Material reported as quantity produced per hectare for multicut species

Tableau 3 : Rendements ajustés annuels et moyenne des deux années avec écarts types résiduels et classement des modalités en termes de productivité.

Modalité	2021		2022		Rendement moyen (tMS/ha)	ETR (sur rendement moyen)	Groupes homogènes comparaison entre espèce
	Rendement annuel (tMS/ha)	ETR	Rendement annuel (tMS/ha)	ETR			
Sorgho multi. [SudanxBicolor]	10.6	0.81	10.3	0.90	10.5	0.92	a...
Sorgho multi. [Sudan grass]	10.3	0.97	10.0	0.85	10.1	0.66	ab..
Sorgho multi. [SudanxBicolor BMR]	10.0	0.56	9.6	0.66	9.8	0.91	abc.
Sorgho multi. [SudanxSudan BMR]	9.3	0.91	9.0	0.52	9.1	0.83	abcd
Millet perlé	NA	NA	8.9	0.72	8.9	0.72	abcd
Sorgho multi. PPS	8.1	0.87	7.8	0.55	8.0	0.68	.bcd
Moha	8.0	0.82	7.7	0.82	7.8	0.78	.bcd
Millet perlé [BMR]	7.8	0.86	7.5	0.40	7.6	0.86	..cd
Teff grass	7.0	0.52	6.7	1.25	6.8	0.84	...d

En effet, pour 2021, la production de kg de MAT/ha s'échelonne de 743 kg de MAT/ha pour le teff grass à 888 kg de MAT/ha pour le sorgho multicoupe Sudan x Bicolor BMR alors que le premier produit seulement 7 t MS/ha et que le second produit 10 t MS/ha. En 2022, la production de kg de MAT/ha s'échelonne de 947 kg de MAT/ha pour le teff grass à 1278 kg de MAT/ha pour le millet perlé alors que le premier produit 6.7 t MS/ha et que le second produit 8.9 t MS/ha.

3.2-Des valeurs alimentaires qui diminuent avec l'avancée des stades

Les prélèvements d'échantillons de chaque espèce à des stades précis ont permis de déterminer une cinétique d'évolution de leur teneur en MAT et en énergie exprimée en unité fourragère lait (UFL/kg MS – référentiel INRA 2018).

Au cours du premier cycle (Figure 3), l'analyse en réseau par stade de prélèvement ne montre de différence significative entre espèce que pour les stades EPI ($p = 0,045$) et FLO ($p = 0,050$). En effet, à EPI, le teff grass montre un meilleur niveau de MAT que le sorgho multicoupe Sudan non BMR et le sorgho multicoupe hybride BMR. À FLO, les deux sorghos cités précédemment ont un taux de MAT significativement inférieur à celui du millet perlé BMR. Les teneurs en MAT diminuent fortement entre les stades E10 et DFE passant en moyenne de 16,7 % à 10,7 %. On observe la même dégradation

des valeurs alimentaires que l'on connaît sur les graminées prairiales (Nozière et al., 2018).

Au cours du deuxième cycle de production (Figure 4), les teneurs en MAT des repousses sont significativement différentes entre espèce à R+4 ($p = 0,009$) et à R+6 ($p = 0,030$). Pour le premier prélèvement, le teff grass a une teneur en MAT significativement plus faible que le moha ou le millet perlé non BMR. Deux semaines plus tard, les valeurs du sorgho multicoupe Sudan non BMR ont nettement diminué et sont significativement inférieures au millet perlé non BMR qui reste en haut du tableau. Globalement, contrairement aux observations au cours du premier cycle, les teneurs en MAT se maintiennent mieux au cours du développement du deuxième cycle passant de 14.2 % à 11.0 % entre R+4 et R+8 après la première récolte.

Concernant la valeur énergétique, aucune différence significative entre espèce n'est observée à E10 ($p = 0.95$). En revanche, pour les autres stades, le millet perlé BMR présente à chaque fois un niveau énergétique significativement supérieur à celui du sorgho multicoupe Sudan grass. Le millet perlé BMR et le sorgho multicoupe Sudan grass présentent respectivement des valeurs de 0,89 UFL/kgMS vs 0,78 UFL/kgMS à DFE, 0,90 UFL/kgMS vs 0,76 UFL/kgMS à EPI et 0,87 UFL/kgMS vs 0,73 UFL/kgMS à FLO (figure 3).

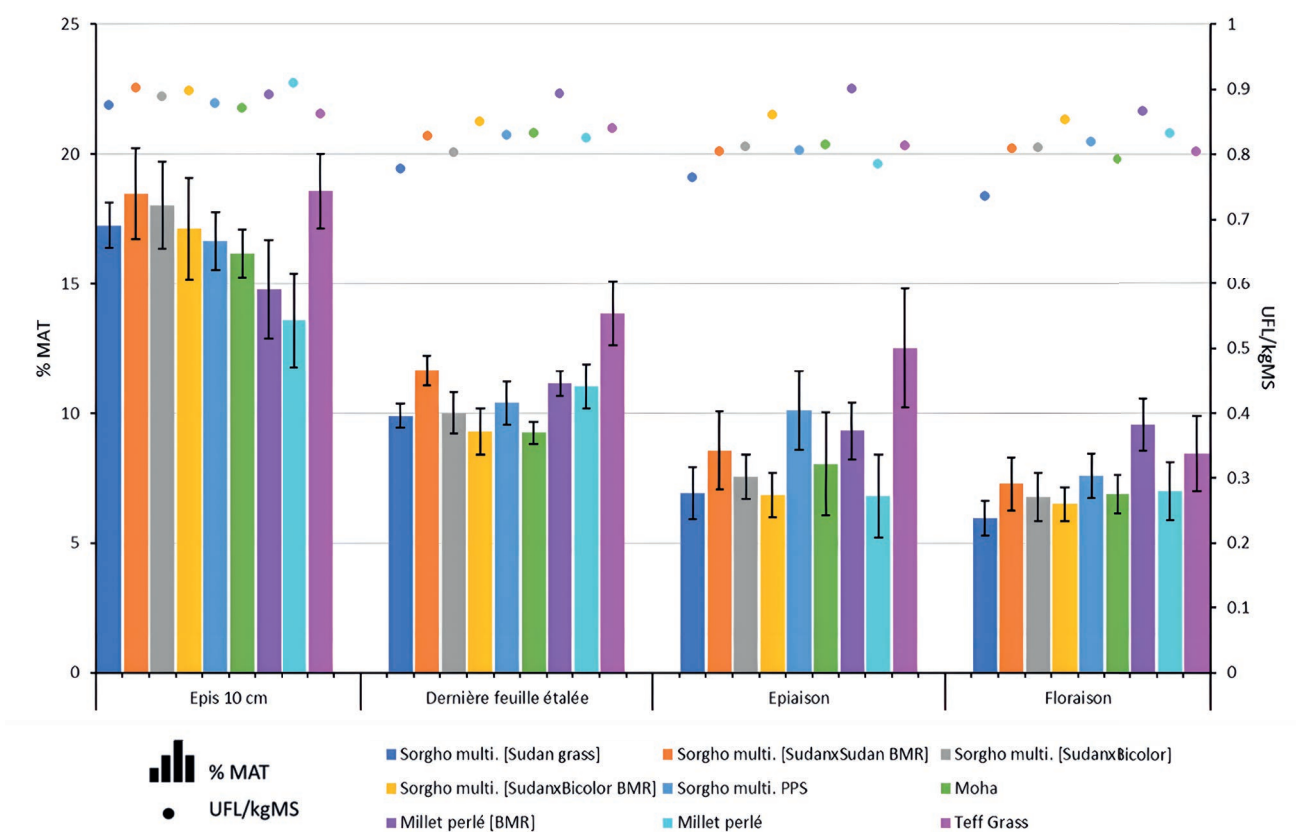


Figure 3 : Evolution de la teneur en MAT (% MS – avec écart type résiduel) et des UFL (INRA 2018) en fonction des stades de développement lors du premier cycle pour chaque graminée étudiée sur les plateformes d'acquisition.

Figure 3: Evolution of the Total Nitrogen Material (%DM – with residual standard deviation) and mid fodder unit (INRA 2018) according to the stages of development during the first cycle for each grass studied on the acquisition trials.

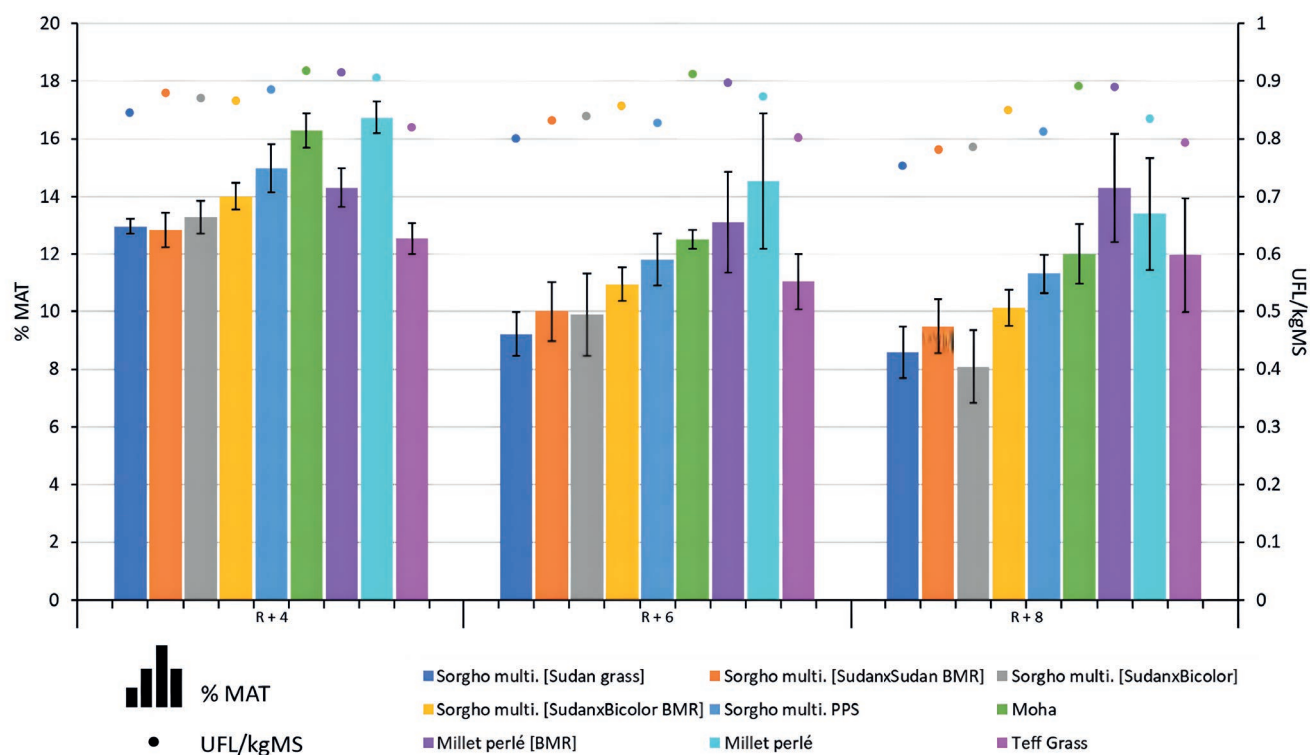


Figure 4 : Evolution de la teneur en MAT (% MS – avec écart type résiduel) et des UFL (INRA 2018) en fonction des stades de développement des repousses pour chaque graminée étudiée sur les plateformes d'acquisition.

Figure 4: Evolution of the Total Nitrogen Material (%DM – with residual standard deviation) and mid fodder unit (INRA 2018) according to the stages of development of regrowth for each grass studied on the acquisition trials.

Au cours du deuxième cycle, on constate un effet significatif de l'espèce pour chaque durée de repousse : R+4 ($p = 0,009$), R+6 ($p = 0,013$) et R+8 ($p = 0,032$). Les valeurs énergétiques s'échelonnent de 0.82 à 0.92 UFL/kgMS, de 0.80 à 0.91 UFL/kgMS et de 0.75 à 0.89 UFL/kgMS pour les stades R+4, R+6 et R+8 respectivement. Les valeurs basses correspondent, pour le premier stade, au teff grass et pour les deux autres stades au sorgho multicolore Sudan grass. Les valeurs hautes correspondent, pour les trois stades de repousses, au moha, suivi de près par le millet perlé BMR (figure 4).

3.3-Une valeur ajoutée de l'association d'une légumineuse discutée

Dans un objectif d'atteindre l'autonomie protéique en période estivale, l'association de légumineuses aux graminées en C4 étudiées dans les plateformes d'acquisition a été testée sur les plateformes de démonstration. L'hypothèse initiale était que l'association d'espèces productives en période estivale (les graminées en C4) avec des espèces riches en protéines (les légumineuses) permettrait de maintenir une autonomie fourragère et protéique sur cette période critique.

Malgré la diminution de la densité de semis des graminées et des légumineuses lorsqu'elles étaient associées (tableau 2), ces dernières n'ont pas réussi à exprimer leur potentiel (figure 5). En effet, dans seulement à peine un tiers des cas, la légumineuse associée à la graminée représente plus de 20 % du rendement, sans excéder les 50 %. Les associations ayant la plus forte contribution

des légumineuses dans le rendement étaient celles avec du millet perlé et du teff grass (24 % en moyenne dans les deux cas). Cela s'explique probablement par une moindre concurrence de ces graminées à faible développement comparée aux autres graminées étudiées et en particulier les sorghos multicolores qui pouvaient mesurer plus de 1.50 m de hauteur.

4-Discussion et perspectives

L'article souligne plusieurs défis et opportunités liés aux CFE, en particulier dans le contexte des fluctuations climatiques et de recherche d'autonomie alimentaire et protéique. Les résultats de cette étude montrent que les graminées C4 présentent un potentiel certain pour assurer la production fourragère en période estivale, même dans des conditions climatiques extrêmes. Leur capacité à maintenir des rendements relativement stables entre 2021 et 2022, deux années caractérisées par des contrastes climatiques marqués, souligne leur résilience (figure 2) dans le cadre de cet essai. En effet, à titre d'exemple, sur la plateforme de la Ferme Expérimentale des Bordes (36), sur la période du 1er mai au 30 septembre, 424 mm de précipitations (P) ont été cumulés en 2021 contre seulement 263 mm en 2022 sachant que la médiane des vingt dernières années se situe à 302 mm. De plus, l'évapotranspiration potentielle (ETP) était supérieure de 200 mm en 2022 par rapport à 2021. L'année 2022 était alors une année record depuis le début des années 2000 avec un bilan hydrique simplifié P-ETP de - 469 mm, soit 350 mm de moins qu'en 2021 (tableau 1).

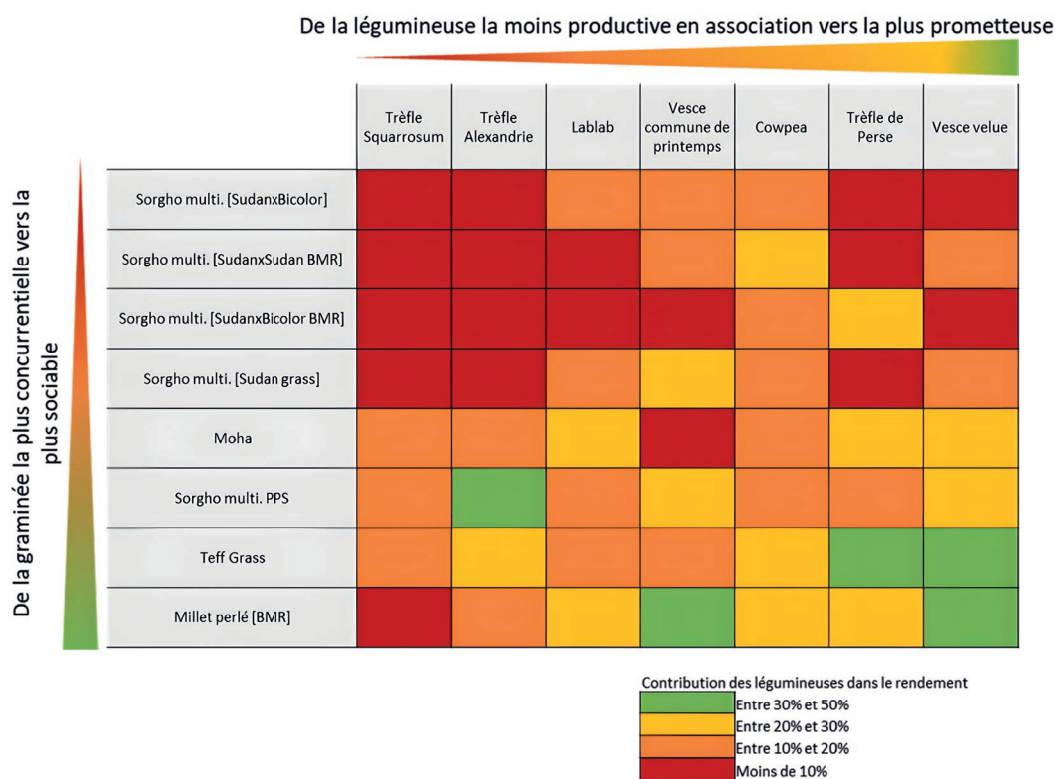


Figure 5 : Contribution des légumineuses dans le rendement sur le dispositif en damier des essais de démonstration pour le premier cycle de récolte
 Figure 5: Contribution of legumes in yield on the checkerboard layout of demonstration trials for the first harvest cycle

Cette performance est liée à leur adaptation physiologique aux hautes températures et à leur capacité à utiliser efficacement l'eau et la lumière. Cependant, les valeurs alimentaires des graminées C4 évoluent au cours du cycle de culture, avec une diminution de la teneur en MAT à épiaison. Il est donc essentiel de gérer les récoltes ou le pâturage, de manière optimale pour maximiser la qualité du fourrage et par conséquent mieux satisfaire les besoins des animaux.

La mise en place des cultures estivales est toujours dépendante d'un contexte pédoclimatique délicat. L'intérêt de valoriser de manière optimale ces cultures est essentiel pour la construction de stock fourrager ou de surface à pâturer mais également pour rentabiliser l'investissement (semences, mécanisation, temps de travail). Il est donc primordial de semer ces cultures dans un sol qui a atteint une température suffisamment élevée (> 12 °C), tout en conservant une certaine fraîcheur pour assurer une germination rapide. La seconde quinzaine du mois de mai est la période idéale. Cela signifie que les CFE doivent être semées soit après une prairie qui arrive en fin de vie, soit après une dérobée d'hiver comme un méteil fourragé récolté précocement ou un ray-grass italien. Une fois les cultures implantées dans les meilleures conditions, un sol riche en matière organique favorisera leur croissance et aidera à prévenir le manque d'eau.

4.1-Toxicité du sorgho et implication pour les ruminants

Le sorgho multicoupe, bien que performant en termes de rendement, pose des problèmes de toxicité, notamment liés à

la présence d'un glucoside cyanogène nommé dhurrine. Cette problématique d'intoxication sur les ruminants est décrite dès l'importation de cette plante en 1858 en Beauce, puis dans le Tarn et les Hautes Pyrénées (Gèze, 1923). La dhurrine s'hydrolyse dans le rumen pour produire de l'acide cyanhydrique provoquant la mort rapide des ruminants (plus particulièrement les ovins et les bovins). Les intoxications observées ont surtout eu lieu sur des animaux ayant pâturés des plantes au stade jeune ou ayant souffert de la sécheresse (Miège, 1933). Il est noté dans les différents pays où l'on trouve plus communément le sorgho, que différents facteurs influent sur la quantité de dhurrine contenue dans la plante (Hugues, 1967), notamment le climat (intensité lumineuse, sécheresse prononcée) mais également des différences de teneur au sein de l'espèce, de la variété et de la partie consommée (stade, organe...). Dans la littérature plus contemporaine, il est communément admis de ne pas faire pâturer les sorghos multicoups par les ruminants avant qu'ils aient atteint une hauteur de 60 cm (CIIRPO, 2023) afin d'écartier tout risque d'intoxication. Malgré ces connaissances, la concentration en dhurrine dans les sorghos reste peu prévisible et a par exemple provoqué un accident sur plusieurs troupeaux de bovin l'été 2022 en Italie : en effet 50 vaches sont mortes après avoir ingéré de jeunes pousses de sorgho stressé par la canicule (Le Parisien Avec Afp, 2022). L'essai CAP PROTEINES, n'a pas étudié ce sujet, mais ce point est un réel frein pour les éleveurs souhaitant alimenter les animaux avec ce fourrage, car contrairement à ce qui est souvent admis, même le fourrage récolté en sec peut s'avérer dangereux pour les ruminants (Bhattarai et al., 2019) ; seule la conservation en ensilage permettrait de diminuer nettement le taux de dhurrine et rendrait inoffensif l'aliment conservé. Hormis la

conservation en ensilage, plusieurs pistes peuvent être développées en agriculture pour limiter les risques d'intoxication, comme i) la sélection de cultivar produisant naturellement moins de dhurrine (Burke *et al.*, 2013), ii) l'amélioration de la gestion du troupeau au pâturage, iii) le développement d'outil au champ permettant de connaître la teneur en dhurrine de la plante et ainsi conseiller l'éleveur sur les périodes de pâturage sans danger pour les animaux.

4.2-Des repousses limitées pour le moha

Le moha présente des limites en termes de capacité de repousse après la première récolte, réduisant son intérêt pour une exploitation multicoupe. Les résultats du projet montrent que la teneur en matière azotée reste compétitive dans les stades précoces, mais elle diminue rapidement au cours des repousses, affectant les performances zootechniques. L'intégration du moha pourrait se limiter à des systèmes moins exigeants en termes de repousse, comme une récolte unique suivie de l'intégration d'une autre culture.

4.3-Les difficultés liées à la culture du teff grass

La graine étant très petite (inférieure au mm), il peut être difficile d'avoir un bon contact sol/graine au moment du semis, même si cela est compensé par un nombre de graines semées au m² élevé (2500 graines/m² à 10 kg/ha) et un passage de rouleau après le semis. En cas de forte sécheresse on note également une atrophie des racines qui entraîne des arrachages de pieds au pâturage par les animaux mais au retour des pluies la prospection racinaire redémarre.

4.4-Le millet vigoureux mais coupant

Le millet testé sur les plateformes présente une bonne vigueur à la levée et est le premier à rayonner dans les essais. Tout comme le moha et le teff grass et contrairement au sorgho, il ne présente pas de risque de toxicité, mais il possède des feuilles relativement coupantes. Cette caractéristique pourrait gêner les animaux et diminuer l'appétence au pâturage.

4.5-Lacune sur les références de valeurs alimentaires

L'intégration de ces ressources fourragères estivales dans les rations des différentes catégories animales nécessite la maîtrise de leurs valeurs alimentaires aux divers stades phénologiques. Toutefois, l'absence de données consolidées sur les graminées en C4 constitue un frein à leur utilisation en systèmes d'élevage. Les dispositifs d'acquisition mis en place dans le cadre du projet CAP PROTEINES ont permis de combler partiellement cette lacune, en générant un jeu de données accessible sur Recherche.data.gouv (<https://doi.org/10.57745/9Z1GYC>).

Cependant, plusieurs problématiques subsistent, comme la variabilité des valeurs alimentaires en fonction du contexte pédoclimatique. Les fluctuations climatiques, comme celles observées entre 2021 et 2022, peuvent influencer considérablement la valeur alimentaire des espèces. Reste également à connaître l'assimilation de ces espèces par les ruminants, car la référence actuelle en termes de données sur l'alimentation des ruminants (Nozière *et al.*, 2018) ne mentionne pas ces végétaux pour le calcul des rations. Une consolidation des références alimentaires dans des outils accessibles serait bénéfique pour les éleveurs et conseillers agricoles.

4.6-Perspectives pour les systèmes d'élevage

Le réseau d'essais CAP PROTEINES démontre l'intérêt des CFE pour les systèmes d'élevage ruminants, mais des études complémentaires sont nécessaires sur :

- L'optimisation des associations graminées-légumineuses : les associations avec des légumineuses nécessitent des aménagements pour améliorer la contribution des légumineuses au rendement et à la qualité du fourrage. Des recherches futures pourraient porter sur l'optimisation des densités de semis, des associations variétales et des pratiques culturales pour améliorer leur efficacité.
- La toxicité des sorghos : si la dhurrine constitue un défi pour l'utilisation des sorghos en pâturage, des solutions existent pour minimiser les risques d'intoxication. Un choix variétal judicieux, associé à une gestion précise des pâturages, notamment en respectant une hauteur de pâturage minimale, permet d'exploiter en grande partie le potentiel fourrager de cette culture. Une collaboration étroite entre chercheurs, éleveurs et sélectionneurs est indispensable pour continuer à améliorer les connaissances sur cette culture et développer des pratiques toujours plus sûres et efficaces.

Les résultats montrent une bonne résilience des graminées en C4 face aux stress hydriques et thermiques, ce qui renforce leur intérêt pour l'élevage dans un contexte de réchauffement global. Cependant ces données seront à conforter avec les conclusions des projets futurs comme Esti'VAL en région Centre-Val de Loire par exemple (ESTI'VAL, 2023).

5-Conclusion

Les graminées en C4 étudiées dans ce projet ont bien démontré leur aptitude à se développer dans un contexte estival chaud et sec, en particulier sur l'été 2022 avec une perte de moins de 1 tMS/ha par rapport aux performances de 2021 dans un contexte bien plus arrosé.

Ce projet démontre également que l'association de légumineuses se justifie rarement en termes de contribution au rendement. Les graminées fourragères multicoups ont quant à elles réussi une fois

levées à produire en quantité et qualité malgré des périodes de stress hydrique marqué en 2022.

Le suivi tout au long du premier cycle des graminées estivales étudiées mène à la même conclusion que les graminées prairiales en termes de qualité fourragère : la MAT décroît et le meilleur compromis quantité – qualité semble se situer avant épiaison. Les niveaux de MAT étant moyens, ce type de fourrage pourrait convenir à des animaux à besoins modérés. Dans une stratégie de pâturage de ces espèces, l'intervention autour du stade épis à 10 cm du plateau de tallage peut convenir à des animaux à besoins élevés compte tenu des valeurs alimentaires. De plus, ce stade coïncide avec une hauteur en végétation d'environ 60 cm pour les sorghos multicoups en-deçà desquels il est fortement déconseillé de les pâturer pour cause de risque de toxicité.

Les CFE, malgré certains inconvénients propres à chaque espèce comme la toxicité du sorgho en dessous de 60 cm, le manque de vigueur à la repousse du moha, le faible enracinement du teff grass ou encore les feuilles coupantes du millet, offrent tout de même une solution alternative pour faire face à la baisse de disponibilité estivale des prairies.

Remerciement

Les auteurs remercient l'ensemble du personnel des sites ayant mis en place et suivi les plateformes d'essais. Merci également à Denis Gautier, Antoine Savoie et Christophe Staub pour avoir contribué à la relecture de cet article. Cette étude a bénéficié du soutien de plan de relance dans le cadre du projet national CAP PROTEINES.

Références bibliographiques

- Bhattarai, B., Singh, S., West, C. P., & Saini, R. (2019). Forage Potential of Pearl Millet and Forage Sorghum Alternatives to Corn under the Water-Limiting Conditions of the Texas High Plains : A Review. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 5(1), 190058. <https://doi.org/10.2134/cftm2019.08.0058>
- Burke, J. J., Chen, J., Burow, G., Mechref, Y., Rosenow, D., Payton, P., Xin, Z., & Hayes, C. M. (2013). Leaf Dhurrin Content is a Quantitative Measure of the Level of Pre- and Postflowering Drought Tolerance in Sorghum. *CROP SCIENCE*, 53(3), 1056-1065. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.09.0520>
- CIIRPO. (2023). *Le pâturage du sorgho fourrager*. https://idele.fr/ciirpo/?eID=cmis_download&olD=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F65a9943-cc8f-4a77-acf2-477284484ae3&cHash=bd903f7ad14398849a7cc36a51ea5113
- Duchene, David, Savoie, Venturi, & Staub. (2022). Dérobées estivales au pâturage, en Région Centre Val de Loire : DERIVAL. *Rencontres Recherches Ruminants*, 26, 169.
- ESTIVAL. (2023, janvier 1). ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/estival>
- Germ Services. (2016). <https://germservices.fr/les-analyses/alimentation-animale/>
- Gèze, J.-B. (1923). Classification et culture des Sorghos. *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*, 3(26), 666-681. <https://doi.org/10.3406/jatba.1923.4111>
- Gigot. (2021). *Résultats d'essais - Cultures fourragères d'été : Quelles espèces*

- retenir? ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/cultures-fourrageres-dete-queles-especes-retenir>
- Hatch, M. D., & Slack, C. R. (1970). Photosynthetic CO₂-Fixation Pathways. *Annual Review of Plant Physiology*, 21(1), 141-162. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.21.060170.001041>
- Hernandez. (2021). Les dérobées estivales, un levier face au déficit fourrager ? *Herbe et Fourrages Centre - Val de Loire, Note technique* (2).
- Hugues P. (1967). Les sorghos fourragers. IV La toxicité des sorghos fourragers et leur consommation en vert par le bétail. *Fourrages*, 32, 57-95.
- Le Parisien Avec Afp, 2022. (2022). *Italie : Une cinquantaine de vaches meurent empoisonnées, à cause de la sécheresse*. leparisien.fr. <https://www.leparisien.fr/societe/italie-une-cinquantaine-de-vaches-meurent-empoisonnees-a-cause-de-la-secheresse-18-08-2022-5PN6TQFZFZH7RJARXWX4IBJKNA.php>
- Legendre, A. (2018). Fourrages complémentaires, méteils, dérobées... De qui parle-t-on ? *Fourrages*, 233, 1-5.
- Miège, É. (1933). Toxicité des Sorghos. *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*, 13(138), 105-113. <https://doi.org/10.3406/jatba.1933.5203>
- Miller, D. (2009). TEFF GRASS: A NEW ALTERNATIVE. 2009 *California Alfalfa & Forage Symposium and Western Seed Conference, Reno*.
- Nozière, P., Sauvant, D., & Delaby, L. (2018). *Inra, 2018. Alimentation des ruminants* (Numéro 4ème ed., p. 728 p.). Editions Quae. <https://hal.inrae.fr/hal-02789908>
- Pavie, J., & Le Gall, A. (2022). L'autonomie protéique des élevages de ruminants en France : Un objectif réalisable ? *Rencontres Recherche Ruminants*, 26, 109-117.
- Planton, S. (2020). Changements climatiques : De la Planète à la France. *Fourrages*, 244, 1-7.
- Sailey, M., Seegers, J., Rouillé, B., & Pavie, J. (2022). Autonomie protéique : Où en sont l'Europe et la France ? *Vers l'autonomie protéique en élevage de ruminants*, 5, 7-21.
- Sédillot, B. (2023). *Chiffres clés du climat France, Europe et Monde*.