



Association Francophone pour
les Prairies et les Fourrages

La revue francophone sur les fourrages et les prairies

The French Journal on Grasslands and Forages

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Francophone pour les Prairies et les
Fourrages

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.fr



AFPF - Maison Nationale des Eleveurs - 149 rue de Bercy - 75595 Paris Cedex 12
Tel. : +33.(0)7.69.81.16.62 - Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

Caractéristiques chimiques, Digestibilité *In Vitro* et Perte de Matière Sèche de différents types d'ensilages de fourrage et de résidus de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br)

H.S. Korombé^{1, 2}, N. Abdou³, V.B. Bado², C. Umutoni², A. Ibrahima², A.S. Gouro¹

Une meilleure utilisation des résidus de mil dans les pays du Sahel, surtout pendant la période de soudure, passe nécessairement par l'adoption de méthodes de conservation adaptées comme l'ensilage. La qualité de cette dernière est évaluée à travers, la composition chimique, la digestibilité in vitro de la matière organique et la perte de matière sèche du produit obtenu.

RESUME

Cette étude a été réalisée pour comparer les effets de la variété, du stade de coupe et de l'ajout de sel sur la composition chimique, la Digestibilité In Vitro de la Matière Organique (DIVMO) et la Perte de Matière Sèche (PMS) des ensilages de mil. Pour ce faire, un plan expérimental randomisé a été utilisé selon l'arrangement 6x2x2 (6 variétés, 2 niveaux d'ajout de sel et 2 stades de coupe). Les résultats obtenus montrent que la composition chimique et la DIVMO des ensilages n'ont pas beaucoup varié entre les fourrages (récoltés au stade floraison en plante entière) et les résidus (récoltés après la récolte des épis pour l'alimentation humaine) avant et après ensilage. Le type variétal a significativement influencé ($p < 0,001$) la matière sèche (MS) produite, le poids final obtenu (Pf) et la PMS des ensilages. Quant à l'ajout de sel, il a significativement impacté, les taux de MS ($p < 0,001$) et de cendres ($p < 0,01$). Concernant le stade de coupe, des différences significatives ($p < 0,001$) ont été enregistrées pour tous les paramètres étudiés à l'exception de la PMS. Cette étude a permis de montrer que l'ensilage permet de préserver la composition chimique et la DIVMO des fourrages et des résidus des six variétés de mil étudiées. Cette technique peut être préconisée pour l'ensemble de ces variétés aux deux stades de coupe avec ou sans ajout de sel, pendant la période d'abondance des résidus de récolte (saison des pluies), pour combler le déficit fourrager de la période de soudure (saison sèche).

SUMMARY

Chemical characteristics, in vitro digestibility and dry matter loss of different types of forage silages and millet residues (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br)

Seasonal variations in fodder quantity and quality hinder the development of ruminant livestock in West African Sahelian countries, like Niger. This situation makes it necessary to find alternative feedstuffs for ruminants. In this context, this study was carried out to evaluate the quality of different types of millet stover silages through the analysis of chemical composition, In Vitro Organic Matter Digestibility (IVOMD) and Dry Matter Loss (DML). For this purpose, a randomized experimental design was used according to the 6x2x2 arrangement (6 varieties, 2 salt addition modalities and 2 cutting stages). The results obtained show that the chemical composition and IVOMD of the silages did not change much compared to the pre-silage millet fodder and residues. Varietal type had an influence ($p < 0.001$) on the Dry Matter (DM), Final Weight (FW) and DML of silages. Salt addition had impact on DM ($p < 0.001$) and Ash ($p < 0.01$) levels, respectively. Higher values were obtained in silages with salt. Regarding the cutting stage, differences ($p < 0.001$) were recorded for all the parameters studied except for the DML. This study showed that the silage technique can preserve the chemical composition and the DIVMO of the forages and stovers of the six millet cultivars studied. Thus, this technique can be promoted for all six cultivars at both cutting stages, with or without adding salt during the period of crop residues and green fodder abundance (rainy season) to make up for the fodder shortage during the lean season (dry season).

AUTEURS

- 1 : Faculté d'Agronomie de l'Université Abdou Moumouni, BP : 10960, Niamey, Niger : korombehmza@yahoo.com
- 2 : Institut International de Recherche sur les Cultures des zones Tropicales Semi-Arides (ICRISAT), BP, 12404, Niamey, Niger ;
- 3 : Institut National de la Recherche Agronomique, BP : 429 Niamey, Niger.

MOTS-CLES : Ensilage, résidus de mil, composition chimique, digestibilité in vitro, perte de matière sèche, sel (NaCl), variété, Stade de coupe, Sahel, Niger.

KEY-WORDS: Silage, millet residue, chemical composition, in vitro digestibility, dry matter loss, salt (NaCl), variety, cutting stage, Sahel, Niger.

REFERENCE DE L'ARTICLE : Korombé H. S., Abdou N., Bado V. B., Umutoni C., Ibrahima A., Gouro A. S., (2023). « Caractéristiques chimiques, digestibilité in vitro et perte de matière sèche de différents types d'ensilages de fourrage et de résidus de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) ». Fourrages 256, 55-65

Dans les pays sahéliens de l'Afrique de l'Ouest, la production de ressources alimentaires pour les animaux en quantité et en qualité suffisantes est le principal facteur limitant de la productivité des systèmes d'élevage (Amole et Ayantunde, 2016). Au Niger, la faible disponibilité des ressources alimentaires pour les animaux entraîne de faibles performances du cheptel (FAO, 2020). Les systèmes dominants associant agriculture-élevage et le pastoralisme sont essentiellement basés sur l'exploitation des parcours naturels et des résidus de cultures, qui se caractérisent par des variations saisonnières et interannuelles de leur quantité et de leur qualité (Karimou et Atikou, 2002 ; Fernández *et al.*, 2005).

Le mil (*Pennisetum glaucum*) est une culture importante pour les systèmes de production pluviale en raison de sa tolérance aux conditions environnementales difficiles (Karimou et Atikou, 2002 ; Santos *et al.*, 2020). Il constitue également une source d'alimentation pour les ruminants qui valorisent la biomasse résiduelle (feuilles et tiges, appelé ci-après « résidus ») qui reste sur pied après récolte des épis de mil destinés à l'alimentation humaine des grains. L'accroissement de la production de biomasse résiduelle ainsi que la mise au point de techniques de conservation adaptées constitue un enjeu majeur de sécurisation des systèmes d'élevage en assurant la continuité et l'équilibre de l'alimentation des animaux (Kizilsimsek, 2016).

La conservation des fourrages se base sur un principe de réduction de la teneur en eau de la biomasse par séchage (foin) ou par l'acidification par fermentation en milieu anaérobie (ensilage).

Il est connu que la valeur alimentaire des ensilages dépend de la qualité de la plante lors de la mise en silo et de celle du strict respect des règles d'ensilage (Chafri *et al.*, 2008). Les processus fermentaires qui se déroulent dans le silo transforment la matière sèche résiduelle, sa composition chimique et la digestibilité de l'aliment obtenu (Dulphy et Van Os, 1996). L'ajout de sel (NaCl) au fourrage dans le silo a été proposé pour améliorer la valeur nutritive du produit (Masui *et al.*, 1979 ; McLaughlin *et al.*, 2002 ; Jerry, 2013), avec un impact variable selon la variété et le stade de coupe de la culture (Charmley, 2001 ; Morales *et al.*, 2014).

Cette étude a testé expérimentalement la technique d'ensilage, avec ou sans adjonction de sel, sur les biomasses résiduelles de mil. Il s'agit d'apporter une preuve de concept de sa pertinence pour l'amélioration de l'alimentation des ruminants pendant la période de soudure au Niger. Notre hypothèse est que la technique d'ensilage permet de conserver ou d'améliorer la valeur alimentaire des résidus de biomasse de mil. Plus précisément, notre étude propose :

- i. d'évaluer les effets de la technique d'ensilage sur la composition chimique et la digestibilité *in vitro* de l'ensilage de mil en fonction de la

variété, du stade de coupe et de l'adjonction de sel ;

- ii. de mesurer les effets de la variété, de l'ajout de sel et du stade de coupe sur la composition chimique, la digestibilité *in vitro* et la perte de matière sèche des ensilages.

1. Matériel et méthodes

1.1. Site de l'essai

L'essai a été conduit à la station expérimentale de Sadoré (13°14'N ; 2°16'E) de l'Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides (Centre Sahélien ICRISAT, Niger). Durant l'expérimentation (de la production des cultures à la préparation des ensilages) qui a eu lieu entre le 29 juin 2019 et le 13 janvier 2020, les températures minimale et maximale moyennes étaient respectivement de 22,8±4,05°C et 36,4±3,91°C, avec une moyenne générale de 29,64±3,51°C. La quantité totale de pluie tombée sur la même période était de 657mm.

1.2. Plan de l'essai

Un plan expérimental complètement randomisé a été utilisé. Trois facteurs ont été analysés :

- i. la variété de mil, avec 6 modalités constituées par 4 variétés améliorées à double usage Chakti, ICMV167005 (Mil de Siaka), ICMV167006 (ICRI-Tabi), ICMH177111 (Alambana) et deux variétés locales (Maywa et Locale Sadoré),
- ii. le stade de coupe : avec le stade floraison, où la plante est récoltée entière pour être ensuite ensilée (ensilage plante entière, appelé par la suite « fourrage » ou FOUR) et le stade maturité où l'on procède dans un premier temps à la récolte des grains pour l'alimentation humaine suivi d'une récolte de la biomasse résiduelle (ensilage biomasse résiduelle, appelé par la suite « résidu » ou RESI),
- iii. l'ajout de sel, avec deux modalités : sans apport et apport de sel à raison de 1 % de la masse de biomasse fraîche (plante entière ou biomasse résiduelle) ensilée (Tamboura *et al.*, 2005).

La combinaison des différentes modalités testée (6x2x2) a donné 24 traitements. Chaque traitement a été répété 3 fois donnant 72 répétitions pour l'ensemble de l'essai.

1.3. Itinéraire de culture et modalité de récolte des échantillons

Les cultures de mil supports de cette expérimentation ont été conduites du 29 juin au 14

Variétés	Stade	NJAS	NJFM
Chakti	Floraison	45	31
	Maturité	76	
Mil de Siaka	Floraison	73	42
	Maturité	115	
ICRI-Tabi	Floraison	72	40
	Maturité	112	
Alambana	Floraison	71	55
	Maturité	126	
Maywa	Floraison	88	50
	Maturité	138	
Locale Sadoré	Floraison	75	41
	Maturité	116	

TABLEAU 1 : Nombre de jours après semis (NJAS) et nombre de jours entre la floraison et la maturité (NJFM) en fonction de la variété et du stade de la coupe.

Table 1 : Number of days after sowing (NJAS) and number of days between flowering and maturity (NJFM) according to variety and cutting stage.

Novembre 2019. La parcelle élémentaire avait une surface de 3300m². La récolte des échantillons FOUR et RESI a été réalisée à des dates différentes pour chaque variété, pour tenir compte des dynamiques d'atteinte des stades phénologiques considérés (floraison, maturité). Le nombre de jour entre la floraison et la maturité (NJFM) a varié de 31 à 55 jours selon les variétés (Tableau 1).

1.4. Préparation des ensilages

Les échantillons ont été prélevés dans les parcelles avec des machettes et hachées en petits brins de 2 à 5 cm à l'aide d'un broyeur de type Seth Tufail Toka Machine 37397 (Morales *et al.*, 2015 ; Trevisoli *et al.*, 2017). Ensuite, un poids initial (Pi) de 20 kg de matière fraîche de fourrages (FOUR) ou résidus (RESI) de mil (Morales *et al.*, 2011), de chaque variété selon le stade de végétation atteint à la coupe (floraison, maturité), a été placé dans des sacs plastiques. Suivant le traitement un ajout de sel (NaCl) a été réalisé. Cette opération a été réalisée par couches compactées à l'aide d'un compacteur manuel. Le sac bien compacté a été introduit dans un deuxième sac pour améliorer les conditions d'anaérobiose. Les sacs ont été ensuite hermétiquement fermés avec des ficelles et du ruban adhésif et gardés en anaérobiose à température ambiante pendant 60 jours (Costa *et al.*, 2012 ; Lyimo, 2017) dans un bâtiment fermé bien aéré. La fermentation a été suivie par examen quotidien de l'état des sacs et des odeurs dégagées.

1.5. Collecte des données

Des échantillons ont été prélevés avant la mise en sac puis à l'ouverture des ensilages après 60 jours de conservation, et placés à l'étuve à 65°C pendant 72 h

pour la détermination des taux de matière sèche (Trevisoli *et al.*, 2017). Les échantillons séchés, ont été ensuite broyés avec des tamis de 1 mm pour les analyses de laboratoire. A 60 jours de conservation, avant la prise des échantillons dans les ensilages, le poids final (Pf) des sacs a été évalué.

1.5.1. Analyse chimique des échantillons avant et après ensilage

Pour chaque traitement, les broyats des échantillons issus des trois répétitions ont été mélangés pour constituer des échantillons composites. Ces derniers, au nombre de 48 (un par traitement avant ensilage et un par traitement après ensilage), ont été analysés par Spectrométrie dans le Proche Infra Rouge (SPIR) au Laboratoire de l'Institut International de Recherche sur l'Elevage (ILRI) au Burkina Faso selon la méthode de Blummel *et al.* (2007), Umutooni *et al.* (2021). Les valeurs, des Cendres, de l'Azote (N), de la Fibre au Détergent Neutre (NDF), de la Fibre au Détergent Acide (ADF), de la Lignine au Détergent Acide (ADL), de l'Energie Métabolisable (EM) et de la Digestibilité In Vitro de la Matière Organique (DIVMO), ont été déterminées. Ensuite, le taux de Protéine Brute (PB) a été calculé en multipliant le pourcentage d'azote par 6,25 (Hassanat *et al.*, 2006).

1.5.2. Perte de Matière Sèche (MS)

La quantité de MS perdue dans les sacs a été déterminée en considérant la différence entre la MS contenue dans les résidus avant ensilage et la MS de l'ensilage obtenu après 60 jours de conservation (Cai *et al.*, 1997 ; Lyimo *et al.*, 2016 ; Lyimo, 2017). Ainsi, pour le calcul de la Perte de Matière Sèche (PMS), la formule suivante a été utilisée :

$$PMS (\%) = \left(\frac{\text{kg de MS du produit non ensilé} - \text{kg de MS de l'ensilage obtenu}}{\text{kg de MS du produit non ensilé}} \right) \times 100$$

La MS contenue dans le produit non ensilé a été obtenue en rapportant le Poids initial (Pi) des sacs d'ensilage (20 kg) au taux de MS des résidus avant ensilage. Quant à la MS des ensilages, elle a été calculée en rapportant le Poids final (Pf) des sacs d'ensilage au taux de MS des ensilages obtenus.

1.6. Analyses statistiques des données

Les données relatives, à la composition chimique des ensilages, à la DIVMO et à la PMS, ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à trois facteurs pour un arrangement factoriel des traitements de 6x2x2 (variété, stade de coupe et ajout de sel) en utilisant la procédure GLM de SPSS 20.0. Les 3 facteurs ont été considérés comme variables fixes et les paramètres étudiés comme variables dépendantes. Dans un premier temps, chaque facteur a été étudié indépendamment des autres (n=4 par modalité pour la variété, n=12 par modalité pour l'ajout de sel et n=12 par modalité pour le stade de coupe), puis les interactions entre les différents facteurs ont été déterminées. La comparaison des

moyennes par paire au seuil de signification de 5 %, a été réalisée à travers le test LSD (Least Significant Difference) pour les facteurs à 2 modalités (type de produit, ajout de sel, stade de coupe) et le test de Tukey pour la variété.

2. Résultats

2.1. Composition de la biomasse avant ensilage en fonction de la variété, du stade de coupe et de l'ajout de sel

Certains paramètres de la composition chimique et de la Digestibilité *In Vitro* de la Matière Organique (DIVMO) ont significativement ($p < 0,05$) varié en fonction de la variété, du stade de coupe, et de l'ajout de sel (Tableau 2). Ainsi, les produits avant ensilage des variétés Chakti et Maywa se caractérisent par des taux

relativement élevés en PB, Cendres, EM et DIVMO, tandis que le résultat contraire est observé pour les taux de MS, NDF, ADF et ADL. Quant au stade de coupe, les ensilages de fourrage au stade floraison présentent les meilleures caractéristiques c'est-à-dire, des taux élevés en PB, Cendres, EM, DIVMO et des faibles taux en fibres (NDF, ADF et ADL). L'ajout de sel a significativement augmenté les taux de MS et des Cendres. Il existe une interaction positive entre la variété et le stade de coupe pour la MS, les Cendres et l'ADL (Tableau 2). Les interactions entre facteurs ne sont pas significatives, sauf dans le cas de l'interaction entre Variété et Stade de coupe pour la MS, les Cendres et l'ADL.

2.2. Changement de la composition chimique et de la DIVMO, des biomasses initiales de mil à travers la technique d'ensilage, selon la variété, le stade de coupe et l'ajout de sel

Facteurs	Modalités	Paramètres							
		MS (%)	Cendres (% MS)	PB (% MS)	NDF (% MS)	ADF (% MS)	ADL (% MS)	EM (MJ/kg MS)	DIVMO (%)
Var	Alambana	27,40 ^b	9,29 ^a	8,34 ^{ab}	71,57 ^{ab}	45,19 ^{ab}	5,10 ^{abc}	7,46 ^b	49,68 ^a
	Chakti	26,92 ^b	9,26 ^a	9,68 ^a	67,27 ^{bc}	41,33 ^{bc}	4,79 ^{bc}	7,96 ^a	53,14 ^a
	ICRI-Tabi	33,00 ^a	7,49 ^{ab}	7,10 ^b	72,97 ^a	45,49 ^{ab}	5,46 ^{ab}	7,40 ^b	48,88 ^b
	Locale Sadoré	28,35 ^b	7,97 ^{ab}	8,44 ^{ab}	72,47 ^a	45,96 ^a	5,75 ^a	7,31 ^b	48,47 ^b
	Maywa	27,25 ^b	9,28 ^a	8,93 ^{ab}	66,54 ^c	37,85 ^c	4,47 ^c	8,25 ^a	55,02 ^a
	Mil de Siaka	27,82 ^b	7,73 ^{ab}	7,25 ^b	71,93 ^{ab}	45,94 ^b	5,73 ^a	7,51 ^b	49,09 ^b
	ESM	0,57	0,26	0,35	0,78	0,69	0,14	0,07	0,53
SC	Floraison	22,84 ^b	9,65 ^a	10,09 ^a	68,53 ^b	41,09 ^b	4,26 ^b	8,04 ^a	53,88 ^a
	Maturité	34,08 ^a	7,36 ^b	6,49 ^b	72,38 ^a	46,16 ^a	6,18 ^a	7,26 ^b	47,55 ^b
	ESM	0,33	0,15	0,2	0,45	0,4	0,08	0,04	0,31
AS	Avec sel	29,85 ^a	9,30 ^a	8,24 ^a	69,71 ^a	43,42 ^a	5,14 ^a	7,66 ^a	50,63 ^a
	Sans sel	27,06 ^b	7,70 ^b	8,34 ^a	71,20 ^a	43,83 ^a	5,30 ^a	7,64 ^a	50,80 ^a
	ESM	0,33	0,15	0,2	0,45	0,4	0,08	0,04	0,31
Significatio ns	Var	***	*	*	**	**	**	**	**
	SC	***	***	***	**	***	***	***	***
	AS	***	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NB : Dans chaque colonne, en fonction des facteurs, les moyennes avec au moins une lettre identique en exposant ne sont pas statistiquement différentes entre elles. ESM : Erreur Standard de la Moyenne ; NS : Non Significatif ; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

TABLEAU 2 : Composition chimique et DIVMO des fourrages et résidus de mil avant ensilage en fonction de la variété, du stade de coupe, de l'ajout de sel et des interactions entre facteurs. MS : Matière Sèche ; PB : Protéine Brute ; NDF : Fibre au Détergent Neutre ; ADF : Fibre au Détergent Acide ; ADL : Lignine au Détergent Acide ; EM : Energie Métabolisable ; DIVMO : Digestibilité *In Vitro* de la Matière Organique ; % MS : En Pourcentage de Matière Sèche ; MJ/kg MS : Méga Joule par kilogramme de Matière Sèche ; Var : Variété ; SC : Stade de Coupe ; AS : Ajout de Sel.

Table 2 : Chemical composition and DIVMO of forages and millet residues before silage as a function of variety, cutting stage, salt addition and interactions between factors. MS: Dry Matter; PB: Crude Protein; NDF : Neutral Detergent Fiber; ADF: Acid Detergent Fiber; ADL: Acid Detergent Lignin; EM: Metabolisable Energy; DIVMO: In Vitro Digestibility of Organic Matter; % MS: Percentage of Dry Matter; MJ/kg MS: Mega Joule per kilogram of Dry Matter; Var: Variety; SC: Cutting Stage; AS: Added Salt.

Les changements de la composition chimique et de la DIVMO subis par les biomasses initiales à travers le processus d'ensilage selon la variété, le stade de coupe et l'ajout de sel sont présentés dans le tableau 3.

2.2.1. Changement de la composition chimique et de la digestibilité *in vitro* de la matière organique selon la variété

La composition chimique et la DIVMO n'ont pas beaucoup changé entre les produits avant et après ensilage selon la variété (Tableau 3). Ainsi, seuls les ensilages des variétés Chakti et Locale Sadoré présentent une diminution significative ($p < 0,05$) des taux de MS et ceux de la variété Maywa une augmentation significative ($p < 0,05$) du taux de NDF par rapport aux produits avant ensilage.

2.2.2. Changement de la composition chimique et de la digestibilité *in vitro* de la matière organique selon le stade de coupe

Selon le stade de coupe, la composition chimique et la DIVMO des produits avant ensilage n'ont pas connu beaucoup de transformations au cours du processus d'ensilage (Tableau 3). Ainsi, c'est seulement pour les ensilages du stade floraison qu'il a été observé, d'une part une augmentation significative ($p < 0,05$) de l'EM et de la DIVMO et d'autre part une diminution significative ($p < 0,05$) du taux de PB.

Néanmoins, on observe une tendance générale à la diminution du taux de MS et à l'augmentation de celui des Cendres dans tous les ensilages par rapport aux produits d'origine (Tableau 3).

2.2.3. Changement de la composition chimique et de la digestibilité *in vitro* de la matière organique selon l'ajout de sel

La variation de la composition chimique et de la DIVMO entre les produits avant et après ensilage n'a pas été significativement ($p < 0,05$) influencée par l'ajout de sel (Tableau 3). Néanmoins, on observe des tendances générales, d'une part de diminution des taux de MS, de PB, d'ADF et d'autre part d'augmentation des teneurs en Cendres, NDF, ADL, EM, et DIVMO dans tous les ensilages par rapport aux produits avant ensilage.

2.3. Effets de la variété, du stade de coupe et de l'ajout de sel sur la composition chimique, la digestibilité *in vitro* de la matière organique et la perte de matière sèche des ensilages

Les effets, de la variété, du stade de coupe, de l'ajout de sel et des interactions entre facteurs sur la composition chimique, la DIVMO et la Perte de Matière Sèche (PMS) des ensilages, sont présentés dans le tableau 4. Des interactions significatives entre facteurs ont été notées pour certains paramètres comme la MS,

Facteurs	Modalités	Différences	MS (%)	Cendres (% MS)	PB (%) MS)	NDF (%) MS)	ADF (%) MS)	ADL (%) MS)	EM (MJ/kg MS)	DIVMO (%)
Variété	Alambana	Delta	0,27	-0,99	0,68	-0,41	1,77	-0,1	-0,33	-1,84
		<i>p</i>	0,936	0,466	0,642	0,875	0,644	0,933	0,489	0,638
	Chakti	Delta	4,2	-1,01	0,91	-2,62	-0,05	-0,25	-0,13	-0,15
		<i>p</i>	0,027	0,201	0,376	0,099	0,977	0,706	0,630	0,945
	ICRI-Tabi	Delta	2,33	-1,16	0,79	-1,55	0,58	-0,27	-0,08	-0,58
		<i>p</i>	0,517	0,456	0,702	0,627	0,891	0,850	0,884	0,901
	Locale Sadoré	Delta	4	-1,21	0,92	-0,95	1,39	-0,02	-0,19	-1,25
		<i>p</i>	0,032	0,352	0,531	0,710	0,619	0,985	0,641	0,691
	Maywa	Delta	-1,15	0,87	0,1	-3,25	-2,54	-0,23	0,13	1,33
		<i>p</i>	0,490	0,479	0,931	0,039	0,255	0,758	0,582	0,536
	Mil de Siaka	Delta	-1,76	-1,2	0,28	-1,7	1,66	-0,06	-0,11	-0,92
		<i>p</i>	0,630	0,428	0,871	0,490	0,609	0,958	0,830	0,794
Stade de coupe	Floraison	Delta	1,28	-0,56	0,98	-1,11	1,72	0,23	-0,25	-1,59
		<i>p</i>	0,069	0,347	0,004	0,151	0,095	0,192	0,025	0,043
	Maturité	Delta	1,36	-1,01	0,25	-2,39	-0,79	-0,54	0,02	0,46
		<i>p</i>	0,259	0,078	0,688	0,115	0,606	0,102	0,907	0,737
Ajout de sel	Avec sel	Delta	1,08	-0,69	0,61	-1,74	0,8	-0,1	-0,08	-0,59
		<i>p</i>	0,52	0,3	0,48	0,26	0,7	0,86	0,76	0,76
	Sans sel	Delta	1,55	-0,88	0,61	-1,76	0,14	-0,2	-0,16	-0,55
		<i>p</i>	0,316	0,179	0,47	0,231	0,932	0,716	0,536	0,774

NB : Pour toutes les abréviations se reporter au tableau 2.

TABLEAU 3 : Différences de composition chimique et de DIVMO entre les produits avant et après ensilage selon la variété, le stade de coupe et l'ajout de sel.

Delta = Moyenne Avant Ensilage – Moyenne Après Ensilage

Table 3 : Differences in chemical composition and DIVMO between pre- and post-silage products according to variety, cutting stage and salt addition.

Delta = Average Before Silage - Average After Silage

l'ADF, l'ADL, l'EM, la DIVMO, le Pf et la PMS pour l'interaction entre Variété et Stade de coupe, ensuite la MS et la PMS pour l'interaction entre Variété et Ajout de sel et enfin le Pf et la PMS pour l'interaction entre Variété, Stade de coupe et Ajout de sel.

2.3.1. Effets de la variété sur les valeurs des ensilages

L'analyse des variations de la composition chimique, de la DIVMO et de la Perte de Matière Sèche (PMS) entre les ensilages, en fonction de la variété (Tableau 4), a révélé des différences statistiquement significatives ($p < 0,001$) pour le taux de MS, le Pf et la PMS. Ainsi, les ensilages d'ICRI-Tabi et de Mil de Siaka présentent les teneurs élevées en MS, tandis que la variété Locale Sadoré a enregistré la valeur la plus élevée du Pf.

Les ensilages des variétés Mil de Siaka et Maywa se caractérisent par des gains de MS. (Tableau 4).

2.3.2. Effets de l'ajout de sel sur les valeurs des ensilages

L'ajout de sel, a significativement augmenté la MS ($p < 0,001$) et les Cendres ($p < 0,01$).

Globalement, malgré l'absence de différence significative, l'ajout de sel a légèrement réduit le taux de fibres (NDF, ADF, ADL), la teneur en PB, l'EM, la DIVMO et la PMS dans les ensilages tandis que le résultat contraire a été obtenu pour le Pf (Tableau 4).

2.3.3. Effets du stade de coupe sur les valeurs des ensilages

En fonction du stade de coupe, des différences hautement significatives ($p < 0,001$) ont été enregistrées entre les moyennes, pour tous les paramètres étudiés, à l'exception du Poids initial (Pi) et de la PMS (Tableau 4).

Les ensilages du stade floraison présentent une abondance de Cendres, de la PB, de l'EM, de la DIVMO et du Pf, tandis que ceux du stade maturité se caractérisent par des taux plus élevés en MS, en fibres (NDF, ADF et ADL) et en PMS (Tableau 4).

Facteurs	Modalités	Paramètres										
		MS (%)	Cendres (% MS)	PB (% S)	NDF (% MS)	ADF (% MS)	ADL (% MS)	EM (MJ/kg MS)	DIVMO (%)	Pi (kg)	Pf (kg)	PMS (%)
Var	Alambana	27,13 ^c	10,28 ^a	7,66 ^a	71,98 ^a	43,42 ^a	5,2 ^a	7,79 ^a	51,52 ^a	20 ^a	19,77 ^{abc}	1,63 ^{cd}
	Chakti	22,72 ^e	10,27 ^a	8,77 ^a	69,89 ^a	41,38 ^a	5,04 ^a	8,09 ^a	53,29 ^a	20 ^a	19,61 ^c	16,74 ^a
	ICRI-Tabi	30,67 ^a	8,65 ^a	6,31 ^a	74,52 ^a	44,91 ^a	5,73 ^a	7,48 ^a	49,46 ^a	20 ^a	19,72 ^{abc}	8,82 ^{bc}
	Locale Sadoré	24,35 ^d	9,18 ^a	7,52 ^a	73,42 ^a	44,57 ^a	5,77 ^a	7,5 ^a	49,72 ^a	20 ^a	19,9 ^a	14,84 ^a _b
	Maywa	28,40 ^{bc}	8,41 ^a	8,83 ^a	69,79 ^a	40,39 ^a	4,7 ^a	8,12 ^a	53,69 ^a	20 ^a	19,85 ^{ab}	-3,60 ^d
	Mil de Siaka	29,58 ^{ab}	8,93 ^a	6,97 ^a	73,63 ^a	44,28 ^a	5,79 ^a	7,62 ^a	50,01 ^a	20 ^a	19,66 ^{bc}	-5,72 ^d
	ESM	0,52	0,80	0,89	1,66	2,45	0,81	0,33	2,59	0,00	0,05	1,84
SC	Floraison	21,56 ^b	10,21 ^a	9,11 ^a	69,64 ^b	39,37 ^b	4,03 ^b	8,29 ^a	55,47 ^a	20 ^a	19,87 ^a	5,18 ^a
	Maturité	32,72 ^a	8,37 ^b	6,24 ^b	74,77 ^a	46,95 ^a	6,72 ^a	7,24 ^b	47,09 ^b	20 ^a	19,64 ^b	5,72 ^a
	ESM	0,30	0,34	0,32	0,66	0,77	0,18	0,11	0,74	0,00	0,03	1,06
AS	Avec sel	28,77 ^a	9,99 ^a	7,63 ^a	71,45 ^a	42,62 ^a	5,244 ^a	7,74 ^a	51,22 ^a	20 ^a	19,76 ^a	4,20 ^a
	Sans sel	25,51 ^b	8,58 ^b	7,73 ^a	72,96 ^a	43,69 ^a	5,5 ^a	7,80 ^a	51,35 ^a	20 ^a	19,74 ^a	6,70 ^a
	ESM	0,30	0,34	0,54	0,66	0,77	0,18	0,11	0,74	0,00	0,03	1,06
Significations												
	Var	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-	***	***
	SC	***	**	***	***	***	***	***	***	-	***	NS
	AS	***	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-	NS	NS

NB : Dans chaque colonne, en fonction des facteurs, les moyennes avec au moins une lettre identique en exposant ne sont pas statistiquement différentes entre elles.

Pour toutes les abréviations se reporter au tableau 2.

TABLEAU 4 : Composition chimique, DIVMO et Perte de Matière Sèche des ensilages en fonction de la variété, du stade de coupe, de l'ajout de sel et des interactions entre facteurs

Table 4 : Chemical composition, DIVMO and Dry Matter Loss of silages according to variety, cutting stage, salt addition and interactions between factors

2.3.4. Effets des interactions entre facteurs sur les valeurs des ensilages

Certaines interactions entre facteurs ont significativement influencé la composition, la DIVMO et la PMS des ensilages (Tableau 4). Ainsi, l'interaction entre la variété et le stade de coupe a significativement influencé la MS, l'ADF, l'ADL, l'EM, la DIVMO, le Pf et la PMS. Quant à l'interaction entre la variété et l'ajout de sel, elle n'a significativement influencé que la teneur en MS et la PMS. Une interaction positive a été également observée entre les trois facteurs pour le Pf et la PMS.

3. Discussion

3.1. Analyse de la composition des fourrages et résidus de mil avant ensilage en fonction de la variété, du stade de coupe et de l'ajout de sel

Les variations de la composition chimique et de la DIVMO des produits avant ensilage, en fonction de la variété et du stade de coupe obtenues dans notre étude sont conformes à celles rapportées par Hassanat *et al.* (2006). De façon générale si la coupe est tardive, on remarque des tendances générales, d'une part à l'augmentation du taux des fibres (NDF, ADF et ADL) et d'autre part à la diminution de la PB, de l'EM et de la DIVMO.

Les résultats obtenus dans notre étude pour les taux de MS et d'ADF des fourrages de mil avant ensilage au stade floraison (Tableau 2) appartiennent respectivement aux intervalles de 22,72 à 29,26 % et de 42,31 à 44,45 % rapportés par Kamali *et al.* (2012) en étudiant le fourrage de mil aux stades floraison précoce et pâte molle des grains. Cependant, ces auteurs ont obtenu des ensilages avec plus de PB et moins de NDF. Ces résultats peuvent s'expliquer à travers des différences variétales et des conditions édapho-climatiques dans lesquelles les résidus ont été produits dans les deux essais.

3.2. Comparaison entre la composition chimique, la digestibilité *in vitro* de la matière organique des ensilages et des produits avant ensilage

A travers les résultats de cette étude, il ressort que la composition chimique et la DIVMO des ensilages n'ont pas beaucoup changé en fonction des facteurs étudiés (Tableau 3). Ainsi pour certaines modalités, de la variété, du stade de coupe et de l'ajout de sel les moyennes des différents paramètres n'ont pas significativement changé par rapport à celles des résidus avant ensilage (Tableau 3). Ce résultat est conforme à celui trouvé par Cai *et al.* (2020) pour tous les paramètres étudiés et corrobore l'affirmation de Baumont *et al.* (2011) selon laquelle les processus de fermentation dans le silo ne

modifient que très peu la digestibilité du fourrage. Cela indiquerait moins de perte d'éléments nutritifs et témoignerait d'une bonne réussite du processus de conservation, car le but recherché à travers une bonne conservation des fourrages est de minimiser les pertes de qualité par rapport au fourrage initial (Baumont *et al.*, 2011). Dans l'ensemble, on observe des relations entre certains paramètres (Tableau 3). Ainsi, dans la majorité des cas, on note une évolution en sens contraire d'une part, entre les taux de MS et de Cendres et d'autre part, entre la PB et le taux de NDF. En effet, une diminution de la MS et de la PB dans les ensilages par rapport aux produits avant ensilage se traduirait par une augmentation respectivement des taux de Cendres et de NDF des ensilages. Kamali *et al.*, (2012) ont rapporté la relation en sens opposé qui lie la PB et la teneur en NDF. De plus, les taux d'ADF et d'ADL ont généralement évolué dans le même sens et en sens opposé de l'EM et de la DIVMO. Tout se passe comme si, lorsque les taux d'ADF et d'ADL diminuent dans les ensilages par rapport aux produits avant ensilage, l'EM et la DIVMO augmentent dans les ensilages. En effet, Andrieu *et al.*, (1999) ont rapporté que la DIVMO dépend étroitement de la teneur en parois indigestibles (ADF et ADL).

3.3. Analyse des effets de la variété sur la composition chimique et la digestibilité *in vitro* de la matière organique des ensilages

Les six variétés de mil utilisées dans notre étude différaient par leur précocité, on peut alors penser que les différences physiologiques peuvent influencer des paramètres de qualité des ensilages, comme cela a été rapporté par Swanckaert *et al.* (2017) en étudiant des ensilages de maïs. Cependant, parmi les paramètres de la composition chimique étudiés et la DIVMO, seule la MS des ensilages a significativement varié selon la variété. A l'opposé, Santos *et al.* (2015) ont trouvé des différences significatives entre les variétés pour la DIVMO, mais pas pour la MS. Ces résultats sont différents de ceux obtenus par Blummel *et al.* (2007), qui ont trouvé des différences significatives en fonction de la variété pour tous les paramètres étudiés.

Ces différences et similitudes entre nos résultats peuvent s'expliquer à travers la variabilité génétique, les conditions environnementales et le type de conservation des résidus (Blummel *et al.*, 2007 ; Umutoni *et al.*, 2021).

3.4. Analyse des effets de l'ajout de sel sur la composition chimique et la digestibilité *in vitro* de la matière organique des ensilages

Des additifs sont disponibles depuis des décennies pour améliorer la conservation de l'ensilage. En fonction de leurs effets sur cette dernière, on distingue :

1. des stimulants de la fermentation,
2. des inhibiteurs de la fermentation,
3. des inhibiteurs de la détérioration aérobie, et
4. des nutriments et absorbants (Muck *et al.*, 2018).

Le sel peut alors être considéré comme un stimulant de la fermentation en limitant la détérioration de l'ensilage à travers la chute du pH (McLaughlin *et al.*, 2002 ; Korombé *et al.*, 2023) et comme nutriment et absorbant, en ce sens qu'il apporte les minéraux Na (39 %) et Cl (61 %) et absorbe l'humidité du produit initial en augmentant le taux de MS (Johansson, 2008 ; Korombé *et al.*, 2023). Le sel est un élément essentiel de l'alimentation des animaux. Il prévient la déshydratation, stimule la digestion et améliore la capacité de l'organisme à absorber les minéraux et les oligo-éléments (Johansson, 2008). Sa disponibilité, son faible coût, sa palatabilité et sa toxicité relativement faible (McLaughlin *et al.*, 2002 ; Johansson, 2008) par rapport aux autres additifs (Urée, Acides, Bactéries lactiques etc...) ont guidé son utilisation dans cette étude.

Ainsi les résultats ont montré que, l'ajout de sel a significativement changé les taux de MS et de Cendres dans les ensilages. Tout se passe comme si, le sel a réduit l'humidité dans les ensilages et a augmenté les minéraux. Cela s'explique aisément car le sel a un pouvoir absorbant à travers l'augmentation de la pression osmotique. En effet, Roberge et Toutain, (1999) ont rapporté que le sel a une forte capacité à absorber l'eau des ensilages. Aussi, Compaoré *et al.* (2020) ont signalé une augmentation notable des cendres dans des échantillons d'oignon séché après un prétraitement au sel.

L'ajout de sel dans notre étude semble avoir un effet négatif sur la DIVMO, même s'il n'existe pas de différences significatives entre les moyennes. Ce résultat est conforme à celui de White *et al.*, (2019) qui ont enregistré une faible diminution de la DIMO en augmentant la quantité de sel de la ration. Ces auteurs ont conclu, que les régimes à haute teneur en sel (NaCl) altèrent la fonction du rumen.

3.5. Analyse des effets du stade de coupe sur la composition chimique et la digestibilité *in vitro* de la matière organique des ensilages

Le choix des stades floraison et maturité dans cet essai a été guidé d'une part, du fait que le stade floraison représente la période optimale pour ensiler le mil (FAO, 2009 ; Morales *et al.*, 2015) et d'autre part, parce que les résidus de mil obtenus après récolte des grains sont utilisés comme alimentation de base pour les ruminants, en particulier pendant la saison sèche, lorsque la pénurie d'aliments s'aggrave dans les zones arides du Sahel (Umutoni *et al.*, 2021). Mais, dans les conditions du Niger, le mil est essentiellement cultivé pour son grain, principale source d'alimentation des populations (Ouendeba et Siaka, 2004). Ainsi, dans la pratique, il serait impossible de sacrifier les grains de mil (coupe au stade floraison) destinés à l'alimentation humaine, pour produire de l'ensilage avec le fourrage. L'amélioration simultanée de la production de grains et de biomasse des cultures de mil, permet d'accroître à la fois la disponibilité d'aliments pour le bétail et la demande alimentaire de la population (Ouendeba et Siaka, 2004 ; Zampaligré *et al.*, 2021). Cependant, les principales contraintes de l'utilisation des résidus de mil dans les petites exploitations agricoles sont la perte progressive de leur valeur nutritionnelle, de leur ingestibilité, de leur digestibilité au cours du stockage traditionnel (Cai *et al.*, 2020) et le faible taux d'humidité à la récolte qui empêche leur conservation par ensilage. L'Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides (ICRISAT) en collaboration avec l'Institut international de recherche sur l'élevage (ILRI) ont développé des variétés de mil à double usage avec des rendements élevés en grains et en résidus et des caractéristiques de persistance de la couleur verte et de l'humidité (Umutoni *et al.*, 2021) qui rendent ensilables les résidus de mil. Néanmoins, les résultats de cette étude ont montré que les ensilages produits au stade maturité ont une qualité inférieure à ceux produits au stade floraison.

En effet, avec l'augmentation du niveau de maturité de la plante, les teneurs en MS, NDF, ADF et ADL ont augmenté ($p < 0,005$) dans les ensilages, tandis que les cendres, la PB, l'EM et la DIVMO ont diminué ($p < 0,005$). Ceci peut s'expliquer à travers le fait que le stade de développement des plantes a un effet sur leur composition chimique et leur DIVMO (Charmley, 2001). Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Amodu *et al.* (2001), Khan *et al.* (2007, 2011), Santos *et al.* (2020) sur des ensilages de mil, de sorgho et de maïs. En effet, Ball *et al.* (2001), Baumont *et al.* (2009) ont rapporté que, la teneur en fibres (NDF, ADF, ADL) augmente avec la croissance de la plante, et que leur digestibilité diminue avec le vieillissement des tissus, d'où la diminution de la valeur énergétique (EM) de la plante et par conséquent la baisse de la qualité du

fourrage. De même, Riaz *et al.* (2014) ont rapporté que la DIVMO évolue, d'une part dans le même sens que le taux de PB et d'autre part en sens opposé du taux d'ADF.

Les taux moyens de MS à la floraison (21,56 %) et à la maturité (32,72 %) obtenus dans notre essai semblent être en accord avec ceux trouvés par Morales *et al.* (2015) qui étaient de 21,83 % et 29,5 % respectivement aux stades floraison et remplissage des grains. Quant aux taux de PB, Cendres et DIVMO, Morales *et al.* (2015) ont rapporté des valeurs supérieures à celles enregistrées dans cette étude pour les deux stades, contrairement aux fibres (NDF, ADF, ADL) pour lesquelles le résultat opposé a été obtenu. En effet, plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences et similitudes entre nos résultats dont notamment, les conditions édapho-climatiques, le nombre de jour moyen avant récolte considéré pour les stades de coupe, le nombre et le type de variétés utilisées, les techniques d'ensilage utilisées et la durée de conservation des ensilages.

3.6. Analyse de la perte de matière sèche des ensilages

Dans notre étude, la perte de matière sèche des ensilages semble être liée au taux d'humidité. Ainsi, les ensilages les plus humides ont enregistré les pertes les plus élevées. La même observation a été faite par Lyimo *et al.* (2016) et Lyimo (2017) en étudiant des ensilages d'herbe à éléphant (*Pennisetum purpureum*) et d'herbe du Guatemala (*Tripsacum laxum*). En effet, une teneur en humidité plus élevée, offre des conditions plus favorables aux bactéries clostridiales et aux entérobactéries qui sont des producteurs de gaz et des générateurs d'ensilages à fermentation inadéquate et à faible teneur en MS (Furtado *et al.*, 2019).

Les pertes de MS ont fluctué selon la variété, de - 5,72 % (soit 0 % de PMS) à 16,74 % avec une moyenne générale de 7,01 %. Cette variation de la PMS en fonction de la variété a été rapportée par Swanckaert *et al.* (2017). Les valeurs de PMS enregistrées dans cette étude appartiennent à l'intervalle de 0 à 28,6 % avec une moyenne de 6,2 % rapporté par Goesser *et al.* (2015) à travers une méta-analyse sur les pertes de MS dans les ensilages. Ces dernières seraient généralement liées à la respiration des plantes qui peut réduire les fractions glucidiques, qui sont également fermentés en acide lactique et en Acides Gras Volatils (Sheaffer *et al.*, 2006 ; Martineau, 2007 ; Baumont *et al.*, 2011).

Aussi, les résultats du Tableau 4 laissent croire que l'ajout de sel a influencé la diminution de la PMS même si la différence entre les moyennes n'est pas statistiquement significative au seuil de 5 %. Ces résultats concordent avec ceux de Cai *et al.* (1997), Rabelo *et al.* (2014) qui ont par contre obtenu une diminution de la PMS avec différences significatives après ajout de 4 %, 2 % et 1 % de sel dans des ensilages de sorgho et de canne à sucre.

Les gains de MS, par rapport aux résidus avant ensilage, enregistrés dans la présente étude pour les ensilages de certaines variétés, peuvent être dus à une diminution du taux d'humidité et à des fermentations moins poussées dans ces ensilages. Par conséquent, les sucres solubles seraient faiblement utilisés par les microorganismes lors du processus de fermentation. Le gain de MS serait alors attribué à la combinaison de deux facteurs : (i) faible consommation des sucres solubles par les microorganismes ; et (ii) forte diminution de l'humidité par évaporation lors du processus d'ensilage.

Conclusion

La présente étude sur la composition chimique, la Digestibilité *In Vitro* de la Matière Organique (DIVMO) et la perte de Matière Sèche (PMS) des ensilages de fourrages et de résidus de mil a permis de montrer que le procédé d'ensilage ne modifie pas beaucoup les caractéristiques des biomasses d'origine, et par conséquent permet de préserver leur qualité sur une longue période. Ainsi, aucun changement significatif de la composition chimique et de la DIVMO n'a été enregistré à travers le processus d'ensilage pour les modalités Alambana, ICRI-Tabi et Mil de Siaka concernant la variété, la modalité maturité pour le stade de coupe et les deux modalités de l'ajout de sel (Tableau 3). Cependant, certains paramètres (MS, PB, EM, DIVMO, PMS) de la qualité des ensilages, ont été influencés par la variété, l'ajout de sel et le stade de coupe. Ainsi, en considérant ces paramètres, les biomasses de la variété Maywa ont donné les meilleurs ensilages, tandis que pour le stade de coupe, une meilleure qualité a été enregistrée avec les ensilages de la floraison. Quant à l'ajout de sel, les ensilages avec sel semblent être de qualité supérieure à celle des témoins. Dans l'ensemble, tous les ensilages obtenus dans cette étude sont de meilleure qualité et les différences observées sont liées aux écarts dans la composition de départ des fourrages et résidus de mil utilisés.

Ces résultats permettent alors de préconiser la technique d'ensilage pendant la période d'abondance des résidus de récolte et du fourrage vert (saison des pluies), pour combler le déficit fourrager pendant la période de soudure (saison sèche).

Remerciement

Cette étude a été possible grâce au soutien généreux du peuple américain à travers l'Agence des États-Unis pour le développement international (USAID) et le Laboratoire d'innovation de Feed the Future pour les systèmes d'élevage géré par l'Université de Floride et l'Institut International pour la Recherche sur l'Élevage (ILRI).

Article accepté pour publication le 15 juin 2023

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amodu J.T., Kallah M.S., Onifade O.S., Omokanye A.T., Adeyinka I.A. (2001): "The effect of harvesting at different growth stages on yield and quality of three late maturing pearl millet accessions in northern Nigeria", *Tropical Grasslands*, 35, 175-179.
- Amole T.A., Ayantunde A.A. (2016): "Improving livestock productivity: Assessment of feed resources and livestock management practices in Sudan-Savanna zones of West Africa", *African Journal of Agricultural Research*, 11(5), 422- 440.
- Andrieu J., Barriere Y., Demarquilly C. (1999): " Digestibilité et valeur énergétique des ensilages de Maïs : le point sur les méthodes de prévision". *INRA Production Animale*, 12 (5), 391-396.
- Ball D.M., Collins .M., Lacefield G.D., Martin N.P., Mertens D.A., Olson K.E., Putnam D.H., Undersander D.J., Wolf M.W. (2001): "Understanding Forage Quality", Park Ridge, IL: American Farm Bureau Federation, Publication 1-01, 18 p.
<https://fyi.extension.wisc.edu/forage/files/2017/04/FQ.pdf>
- Baumont R., Aufrere J., Meschy F. (2009): "La valeur alimentaire des fourrages : rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation", *Fourrages*, 198 (198), 153-173.
- Baumont R., Arrigo Y., Niderkorn V. (2011): "Transformation des plantes au cours de leur conservation et conséquences sur leur valeur pour les ruminants", *Fourrages*, 205, 35-46.
- Blümmel M., Bidinger F.R., Hash C.T. (2007) : "Management and cultivar effects on ruminant nutritional quality of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) stover II. Effects of cultivar choice on stover quality and productivity". *Field Crops Research*, 103, 129-139.
- Cai Y., Ohmomo S., Ogawa M., Kumai S. (1997): "Effect of NaCl-tolerant lactic acid bacteria and NaCl on the fermentation characteristics and aerobic stability of silage", *Journal of Applied Microbiology*, 83(3), 307-313.
- Cai Y., Du Z., Yamasaki S., Jethro D.B., Man N. (2020): "Chemical composition, characteristics concerned with fermentative quality and microbial population of ensiled pearl millet and sorghum stover in semi-arid West Africa", *Animal Science Journal*, 00:e13463.
- Chafri N., Mahouachi M., Chermiti A., Toukebri H. (2008). Caractéristiques nutritionnelles des ensilages produits dans le nord-ouest de la Tunisie. *Rencontres Recherches Ruminants*, 15^{ème} éditions, Paris, les 3 et 4 décembre 2008.
- Charmley E. (2001): "Towards improved silage quality – A review", *Canadian Journal of Animal Science*, 81, 157-168.
- Compaoré S.C., Compaoré H., Go I., Sawadogo-Lingani H. (2020): "Impact du prétraitement au sel (NaCl) et du séchage sur les caractéristiques nutritionnelles et microbiologiques de l'oignon bulbe", *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(3), 685-697.
- Costa K.A.P., Filho I.A.G., Assis R.L., Guimarães K.C., Cruvinel W.S., Epifânio P.S., Gouveia R.R. (2012): "Silage quality of pearl millet cultivars produced in different cutting ages", *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, 33 (3), 1189-1198.
- Dulphy J.P., Van Os M. (1996): "Control of voluntary intake of precision-chopped silages by ruminants: a review", *Reproduction Nutrition Development*, 36, 113-135.
- FAO. (2014): "Résidus agricoles et sous-produits agro-industriels en Afrique de l'ouest: Etat des lieux et perspectives pour l'élevage", Bureau régional pour l'Afrique de la FAO à Accra, 60 p.
- FAO. (2009) : " *Pennisetum americanum* (L.) Leeke", Grassland Index. A searchable catalogue of grass and forage legumes. FAO, Rome, Italy.
https://web.archive.org/web/20170328043724/http://www.fao.org/ag/AGP/A_GPC/doc/GBASE/DATA/PF000297.HTM
- FAO. (2020): "Évaluation, gestion des données et utilisation efficiente des ressources nationales d'alimentation animale pour une gestion durable de la production des ruminants", Rapport projet : TCP/NER/3603, Rome, Italie, 9 p.
- Fernández-Rivera S., Hiernaux P., Williams O.T., Turner D.M., Schlecht E., Salla A., Ayantunde A.A., Sangaré M. (2005): "Nutritional constraints to grazing ruminants in the millet-cowpea livestock farming system of the Sahel", In Ayantunde A.A., Fernández-Rivera S., McCrabb G, "Coping with feed scarcity in smallholder livestock systems in developing countries". Animal Sciences Group, Wageningen UR, Wageningen, The Netherlands, University of Reading, Reading, UK, ETH (Swiss Federal Institute of Technology), Zurich, Switzerland, and ILRI (International Livestock Research Institute), Nairobi, Kenya, 306 p.
- Furtado N.R., Carneiro S.S.M., Coutinho N.D., Cândido D.J.M., Brasil da Silva E. (2019): "Fermentative losses and chemical composition of elephant grass silage added with castor bean hull", *Revista Ciência Agronômica*, 50 (1), 140-147.
- Goeser J.P., Heuer C.R., Crump P.M. (2015): "Forage fermentation product measures are related to dry matter loss through meta-analysis", *The Professional Animal Scientist* 31(2): 137-145.
- Hassanat F., Mustafa A.F., Seguin P. (2006): "Chemical composition and ensiling characteristics of normal and brown midrib pearl millet harvested at two stages of development in southwestern Québec", *Canadian Journal of Animal Science*, 86(1),71-80.
- Jerry W.S. (2013): "Salt may improve corn and sorghum silage fermentation", Salt Institute Newsletter (STM) First Quarter 2013. 700 N. Fairfax St., Suite 600 Alexandria, VA 22314-2040, USA (703) 549-4648, 3 p.
- Johansson K. (2008) "Salt to ruminants and horses", Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Animal Nutrition and Management, 34 p.
- Kamali R., Toghdory A., Mohajer M., Mirhadi S.A., Gholami H. (2012) : "Investigation of quality characteristics of pearl millet silage", *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3 (9), 1854-1858.
- Karimou M., Atikou A. (2002) : "Les systèmes agriculture-élevage au Niger", In Hiernaux P., Tarawali G (eds.), Improving crop. Livestock systems in the dry savannas of West and Central Africa. Reports from the Workshop on crop-livestock systems in the dry savannas of West and Central Africa, 22.27 November 1998, IITA, Ibadan, Nigeria.
- Khan S.H., Khan A.G., Sarwar M., Azim A. (2007) : "Effect of maturity on production efficiency, nutritive value and *in situ* nutrients digestibility of three cereal fodders". *International Journal of Agricultural Research*, 2(11) : 900-909.
- Khan S.H., Azim A., Sarwar M., Khan A.G. (2011) : "Effect of maturity on comparative nutritive value and fermentation characteristics of maize, sorghum and millet silages". *Pakistan Journal of Botany*, 43 (6): 2967-2970.
- Kizilsimsek M., Küsek M., Gezginç Y., Erol A. (2016): "Isolation and Identification of High Lactic Acid Producer Bacteria from Forage and Their Silages Grown in Different Ecologies", *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 22 (2), 291-296.
- Korombé H.S., Bado V.B., Abdou N., Umutoni C., Ibrahima A., Gouro A.S. (2023): "Evaluation of fermentation progress during storage of millet stovers silage based on pH-indicators" *Online Journal of Animal and Feed Research*, 13 (2), 116-126.
- Lyimo B.J., Mtengeti E.J., Urjo N.A., Ndemanisho E.E. (2016): "Effect of fodder grass species, wilting and ensiled amount in shopping plastic bags on silage quality" *Livestock Research for Rural Development*, 28 (8).
- Lyimo J.B. (2017): "Evaluation of strategies for improvement of grass silage quality for smallholder dairy farmers in Tanzania", Thesis submitted in fulfillment of the degree of Doctor of Philosophy of Sokoine University of Agriculture. Morogoro, Tanzania, 151 p.
- Martineau R. (2007): "Impact du mode de conservation des fourrages sur le métabolisme protéique chez la vache laitière", Thèse pour l'obtention du grade de Philosophie Doctor (Ph. D.) en Sciences Animales, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, 251 p.
- Masui M., Onishi H., Unemoto T. (1979) "Halophilic microorganisms". Tokyo: Yishiyakusyupan, 313-348.
- McLaughlin A.M., Erickson P.S., Hussey J.S., Reid E.D., Tanguay J.A. (2002) : Case study: NaCl Addition to the Top Layer of Corn Ensiled in Bunker Silos. *The Professional Animal Scientist*, 18: 90-92.
[https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)31490-X](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)31490-X)
- Morales J.U., Alatorre J.A.H., Escalante A.A., Lopez S.B., Vazquez H.G., Gomez M.O.D. (2011): "Nutritional Characteristics of Silage and Hay of Pearl Millet at Four Phenological Stages", *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 10 (11), 1378-1382.

- Morales J.U., Alatorre A.H., Becerra J.F.C., Vázquez H.G. (2014): "Nutritive characteristics of pearl millet forage in four phenological stages", *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 5(3), 321-330.
- Morales J.U., Alatorre J.A.H., Nieto C.A.R., Becerra J.F.C. (2015): "Forage production and nutritional content of silage from three varieties of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) harvested at two maturity stages", *Journal of Animal & Plant Sciences*, 27(1), 4161-4169.
- Muck R.E., Nadeau E.M.G., McAllister T.A., Contreras-Govea F.E., Santos M.C., Kung Jr L. (2018): "Silage review: Recent advances and future uses of silage additives". *Journal of Dairy Science*, 101:3980-4000.
- Ouendeba B et Siaka B.S. (2004): "Le mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] au Niger: généralités et résultats de la sélection", in Bezançon. G (ed.), Pham. J-L (ed.): Ressources génétiques des mils en Afrique de l'Ouest, Diversité, Conservation et Valorisation : actes de l'atelier "diversité, conservation et valorisation des ressources génétiques des mils". Paris (FRA) ; Niamey : IRD ; ICRISAT, pp33-43.
- Rabelo C.H.S., Costa A.P., Rezende A.V., Härter C.J., Florentino L.A., Rabelo F.H.S. (2014): "What is the best additive to use at the ensiling of sugarcane SP81-3250?", *Animal Production Science*, 54 (10), 1682-1686.
- Riaz M.Q., Südekum K.H., Clauss M., Jayanegara A. (2014): "Voluntary feed intake and digestibility of four domestic ruminant species as influenced by dietary constituents : A meta-analysis", *Livestock Science*, Article in Press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2014.01.009>
- Roberge G., Toutain B. (1999): "Cultures fourragères tropicales", CIRAD, Montpellier (France) : (Repères : CIRAD) ISBN 2-87614-361-5, 374 p.
- Santos R.D.D., Neves A.L.A., Pereira L.G.R., Sollenberger L.E., Rodrigues J.A.S., Tabosa J.N., Verneque R.S., Oliveira G.F., Jayme D.G., Gonçalves L.C. (2015): "Agronomic traits, ensilability and nutritive value of five pearl millet cultivars grown in a Brazilian semi-arid region", *The Journal of Agricultural Science*, 154 (01), 165-173.
- Santos R.D., Neves A.L.A., Pereira L.G.R., Sollenberger L.E., Muniz E.N., Souza E.Y.B., Sobral A.J.S., Costa N.V., Gonçalves L.C. (2020): "Performance, agronomic traits, ensilability and nutritive value of pearl millet cultivar harvested at different growth stages", *The Journal of Agricultural Science*, 1-8.
- Sheaffer C.C., Halgerson J.L., Jung H.G. (2006): "Hybrid and N Fertilization Affect Corn Silage Yield and Quality", *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192(4), 278-283.
- Swanckaert J., Pannecoucq J., Van Waes J., Haesaert G., De Boever J., Reheul D. (2017): "The effect of ensiling on variety rank of forage maize", *The Journal of Agricultural Science*, 155(08), 1253-1262.
- Tamboura H.H., Bougouma V., Traoré A., Kaboré A., Ouédraogo S.B., Sawadogo L. (2005): "Technique de conservation des fourrages par voie humide: L'ensilage", Fiche technique n° 18, CIRDES, 4 p.
- Trevisoli F.C.A., França A.F.S., Corrêa D.S., Trevisoli P.A., Oliveira L.G. (2017): "Nutritional composition of silage from pearl millet cultivars with the inclusion of soy hulls". *Revista Ciência Agrônômica*, 48(3), 540-547.
- Umutoni C., Bado V., Whitbread A., Ayantunde A., Gangashetty P. (2021): "Evaluation of chemical composition and in vitro digestibility of stovers of different pearl millet varieties and their effect on the performance of sheep in the West African Sahel", *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science*.
- White H. C., Davis N. G., Van Emon M. L., Wyffels S. A., DelCurto T. (2019) : "Impacts of increasing levels of salt on intake, digestion, and rumen fermentation with beef cattle consuming low-quality forages". *Translational Animal Science*, 3(1), 1818-1821. doi:10.1093/tas/txz111
- Zampaligré N., Yoda G., Delma J., Sanfo A., Balehegn M., Rios E., Dubeux J.C., Boote K., Adesogan, A. T. (2021) : "Fodder biomass, nutritive value, and grain yield of dual-purpose Pearl Millet, Sorghum and Maize cultivars across different agro-ecologies in Burkina Faso". *Agronomy Journal*, 114, 115-125. doi:10.1002/agj2.20860