

Research Article

EVALUATION DE L'EFFET DU TRAVAIL DU SOL ET DE LA FERTILISATION SUR L'ACCUMULATION DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX DANS LES GRAINS DU MIL EN CULTURE PURE

^{1,*} PALE Siébou, ²KOUMBEMMahamoudou, ¹YONLI Djibril, ¹BARRO Albert, ¹TRAORE Hamidou, ¹PALE Grégoire, ^{3,4}Vara P. V. Prasad, ³B. Jan Middendorf

¹Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, 04 B.P 8645 Ouagadougou 04, Burkina Faso.

²Université Joseph Ki-Zerbo, 03 B.P 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso.

³ Feed the Future Innovation Lab for Collaborative Research on Sustainable Intensification, Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA.

⁴Department of Agronomy, Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA.

Received 03th March 2022; Accepted 04th April 2022; Published online 20th May 2022

RESUME

Le mil [*Pennisetum glaucum*(L.) R. Br.] est la troisième importante céréale cultivée et source d'éléments nutritifs au Burkina Faso. Cette étude réalisée en 2018 et 2019 à la Station de Recherches Agricoles de Saria a pour objectif d'évaluer les effets du travail du sol et de la fertilisation organo-minérale sur les quantités des minéraux accumulés dans les grains de mil et de relier les résultats aux besoins nutritionnels des humains. Le dispositif expérimental était un bloc complètement randomisé avec une disposition des traitements en split-plot, trois répétitions où les parcelles principales correspondaient à quatre niveaux de travail du sol et les parcelles secondaires à huit niveaux de fertilisation organo-minérale. Le compost associé aux engrais minéraux a permis des accumulations plus importantes de minéraux dans les grains allant de 29 à 33 kg pour N, de 5,11 à 5,89 kg pour P, de 8,62 à 10,27 kg pour K, de 1,45 à 1,73 kg pour Mg. L'influence du labour et du scarifiage sur l'accumulation des minéraux a été clairement démontrée laissant observer des quantités plus importantes. Les résultats ont également montré que les éléments minéraux P, Mg, Zn et Fe accumulés dans les grains ont permis des effectifs plus importants d'hommes ou de femmes dont la couverture nutritive annuelle est satisfaite comparativement aux minéraux N, K et Ca.

Mots clés: billonnage cloisonné, céréale, compost, labour, zaï manuel.

INTRODUCTION

L'agriculture burkinabè occupe 84% de la population active et contribue à 35% au PIB (MAAH, 2017). Les productions agricoles constituent la principale source de revenu des populations rurales burkinabè et procurent l'essentiel des besoins nutritionnels de la population (MAAH, 2017). Le mil [*Pennisetum glaucum*(L.) R. Br.] constitue une des plus importantes sources en éléments nutritifs dans les régions semi-arides et arides d'Afrique et d'Inde (Kanattiet *al.*, 2016 ; Anuradha *et al.*, 2017). Cette céréale est très ancrée dans les habitudes alimentaires des populations ouest-africaines (FAO, 2014 ; Békye, 2011). Cependant, au Burkina Faso, force est de constater que les populations sont affectées par la malnutrition avec plus de 45% des ménages agricoles burkinabè n'arrivant pas à couvrir leurs besoins céréaliers malgré les efforts concrétisés par le gouvernement et les partenaires techniques et financiers (MAAH, 2017). La plupart des recherches se sont focalisées sur l'amélioration des rendements en grains et en pailles du mil, avec peu d'attention accordée à l'accumulation des minéraux dans les grains qui influencent la nutrition humaine (Yadav *et al.*, 2017 ; Sanou *et al.*, 2016 ; Toudou *et al.*, 2016 ; Palé *et al.*, 2019). Il n'est plus à démontrer que les éléments minéraux sont essentiels au fonctionnement de l'organisme humain et leurs apports journaliers permettent de compenser les pertes naturelles (Deluzarche, 2018). Cependant, quelques travaux antérieurs ont rapporté des apports d'éléments minéraux nutritifs journaliers recommandés pour les humains (Jacotot & Le Parco, 1992 ; Ward, 2014 ; Deluzarche, 2018). L'objectif de la présente étude est d'évaluer les effets du travail du sol

et de la fertilisation organo-minérale sur les quantités des éléments minéraux contenues dans les grains du mil et d'analyser ces résultats par rapport aux besoins nutritionnels des humains tant en Afrique qu'ailleurs dans le monde.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Site de l'étude

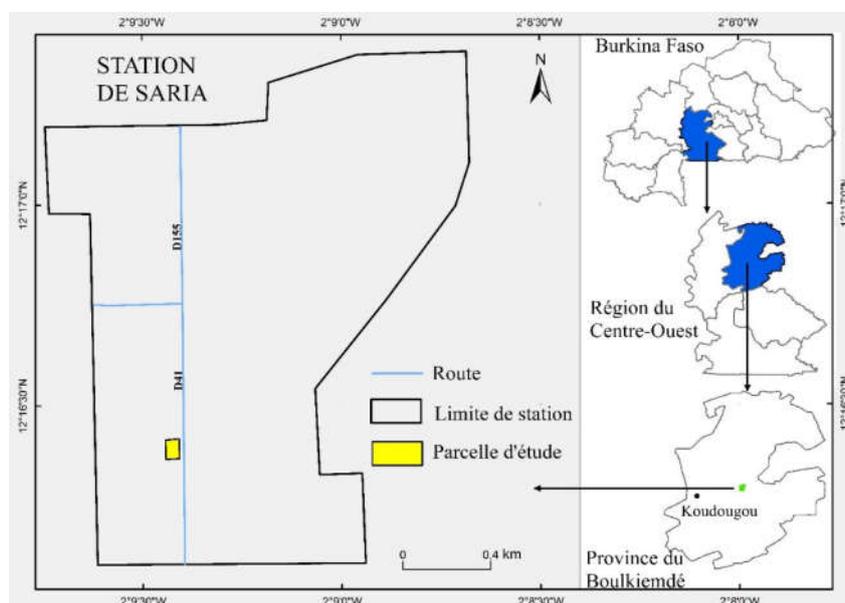
L'étude a été conduite en 2018 et 2019 à la Station de Recherches Environnementales et Agricoles de Saria au Burkina Faso : (12°16' N lat ; 2°09' W long) située dans la zone climatique soudano-sahélienne du Burkina Faso (Figure 1). Le climat est du type tropical avec une saison sèche allant de novembre à avril et une saison pluvieuse de mai à octobre. L'étude a été réalisée sous conditions pluviales. Les pluviométries mensuelles au cours des campagnes agricoles ont varié de 19 à 225,6 mm en 2018 et de 60,3 à 267,3 mm en 2019 (Tableau 1). Celles des dix dernières années (2010 à 2019) ont varié de 42,3 à 253,2 mm. Les résultats indiquent des précipitations plus fortes durant les mois de juillet à septembre. Les températures moyennes annuelles étaient de 21,7°C en minima et 36,4°C en maxima en 2018 et de 21,2°C en minima et de 35,3°C en maxima en 2019 (Koumbem, 2020). L'essai a été conduit sur un sol de type ferrugineux tropical lessivé induré représentant une carapace à environ 50 cm de profondeur, de texture sablo-limoneuse en surface (59,2% de sable, 31,4% de limon et 9,4% d'argile) avec une faible capacité de rétention en eau, un pH (eau) de 5,4. En outre, les teneurs en éléments minéraux du sol principalement N, P et K sont faibles (Koumbem, 2020) et cette faiblesse impose la nécessité donc d'améliorer sa fertilité par le travail du sol et des apports de fertilisants. L'essai a été implanté sur le même terrain pendant les deux années. Le précédent cultural du champ était du niébé cultivé pendant deux ans avant l'implantation de l'essai en 2018.

*Corresponding Author: PALE Siébou,

¹Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, 04 B.P 8645 Ouagadougou 04, Burkina Faso.

Tableau 1. Pluviométries des campagnes agricoles de 2018 et 2019 et la moyenne mensuelle pour la période de 2010 à 2019, Station de recherches environnementales et agricoles de Saria, Burkina Faso

	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Total annuel
	----- mm (nombre de jours de pluie) -----						
Total mensuel 2018	51,7 (5)	99,3 (9)	190,3 (16)	210,7 (15)	225,6 (14)	19 (5)	796,6 (64)
Total mensuel 2019	60,3 (7)	83,5 (6)	248,2 (14)	267,3 (17)	148,5 (13)	66,7 (10)	894,5 (67)
Moyenne mensuelle 2010-2019	63,8	103,8	198,3	253,2	159,6	42,3	

**Fig. 1 Carte de localisation du site d'étude (Station de Recherches de Saria) dans la Région du Centre-Ouest (Carte réalisée par Abdoul Kader DRAME, 2021)**

Matériel végétal

La variété IKMP5de mil dont le cycle végétatif est de 110 jours avec une bonne vigueur à la levée et une résistance à la verse, à la sécheresse, aux insectes, aux maladies (mildiou, ergot et charbon) et au *Striga* (Comité National des Semences, 2014) a été utilisée. Elle est beaucoup demandée par les transformateurs locaux pour la préparation des bouillies infantiles, du tô, des boissons traditionnelles comme le *zom-koom* et le *dolo*.

Fertilisants

La matière organique utilisée est le compost ayant un pH de 8,1 et contenant 15,27% de carbone total (Ctot), 1,40% d'azote total (Ntot), 2,98% de phosphore total (Ptot), 0,64% de potassium total (Ktot) et un rapport C/N de 10,95. Les fertilisants minéraux utilisés sont : le NPK-S-CaO (15N-15P₂O₅-15KCl + 13 SO₃ + 8CaO), l'urée (30N + 3MgO + 8S + 0,3Zn + 0,2B) et l'urée (46 N).

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est un bloc complètement randomisé avec une disposition des traitements en split-plot et trois (03) répétitions où les parcelles principales correspondent à quatre (04) niveaux de travail du sol (Figure 2) et les parcelles secondaires représentées par huit (08) niveaux de fertilisation minérale avec ou sans compost (Tableau 2). Les parcelles élémentaires sont de dix (10) m de long et quatre (04) m de large soit 40 m² séparées par des allées d'un (01) m. Les semis ont été effectués le 5 juillet en 2018 et le 23 juillet en 2019, à une densité de 80 cm (entre les lignes) x 40 cm (entre les poquets) dans toutes les parcelles. Les démarriages ont été effectués le 20 août en 2018 et le 26 août en 2019, à 1-2 plants par poquet dans toutes les parcelles.

Le NPK a été appliqué aux poquets 15 jours après le semis et l'urée 45 jours après le semis. La technique de la microdose qui consiste à appliquer l'engrais à 3-5 cm du poquet de semis a été utilisée pour l'application des engrais minéraux. La dose de compost appliquée par an sur les parcelles sans zaï est de 5,0 t ha⁻¹. Sur les parcelles avec zaï, la dose recommandée de 300g par poquet de zaï a été appliquée soit 9,4 t ha⁻¹. Le compost a été épandu à la volée dans les parcelles devant recevoir du compost avant le scarifiage, le labour et le billonnage. Pour les parcelles de zaï manuel, le compost a été appliqué dans les poquets de zaï. Pour tous les types de travail du sol, le compost a été appliqué dans les parcelles avant le semis. Les doses de compost, d'engrais minéraux NPK et d'urée appliquées sont celles recommandées (vulgarisées) au Burkina Faso par l'Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières (IRAT) et l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) depuis des décennies et reprises par le Centre International de Développement des Engrais (IFDC) en 2018. Les désherbages ont été faits en cas de besoin, tenant compte du niveau d'enherbement des parcelles.

Collecte et analyse statistique des données

La récolte a été réalisée sur une superficie utile de 28,16 m². Les paramètres évalués ont porté sur les teneurs du grain en N, P, K, Ca, Mg, Zn et Fe. Un échantillon de la récolte (grain de mil) a été broyé finement et minéralisé selon la méthode Kjeldahl décrite par Isaac et Johnson (1976). Une prise de 0,5 g de farine tamisée à 0,5 mm a été soumise à une minéralisation avec une solution d'attaque qui est un mélange d'acide sulfurique (H₂SO₄), de sélénium (Se) et d'acide salicylique (C₇H₆O₃) en présence de peroxyde (H₂O₂). Le sélénium est utilisé comme catalyseur. La minéralisation de l'échantillon avec le mélange d'acide sulfurique – sélénium – salicylique est faite par chauffage progressif (100 à 340 °C) jusqu'à minéralisation totale.

Tableau 2. Niveaux de travail du sol et de fertilisation minérale avec ou sans compost

Travail du sol (TS)

TS1 = Scarifiage ou grattage superficiel du sol au cultivateur (houe manga) en vue d'ameublir les dix (10) premiers centimètres du sol.

TS2 = Zaï manuel (traditionnel) dont les trous sont faits sur les lignes de semis en quinconce avec une profondeur de 10 à 15 cm et une largeur de 20 à 40 cm. La terre excavée est disposée en croissant en aval du trou.

TS3 = Labour à la charrue (CH9) avec les bœufs à une profondeur d'environ 15 cm.

TS4 = Billonnage cloisonné. Les billons sont réalisés sur les lignes de semis avant le semis à l'aide de la charrue à corps butteur par traction animale. Les cloisons réalisées un mois après le semis à une distance de 1 m entre deux cloisons à l'aide de dabas, n'ont jamais été ouverts pendant les deux années.

Fertilisation (F)

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	CaO	Mg	Zn	B	Compost
	-----Kg ha ⁻¹ -----								
F1 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	38	15	15	13	8	0	0	0	0
F2 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	68,5	22,5	22,5	19,5	12	0	0	0	0
F3 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	52,5	22,5	22,5	27,5	12	3	0,3	0,20	0
F4 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	30	15	15	17	8	1,5	0,15	0,10	0
F5 = F2 + 5 t ha ⁻¹ compost	68,5	22,5	22,5	19,5	12	0	0	0	5 000
F6 = F1 + 5 t ha ⁻¹ compost	38	15	15	13	8	0	0	0	5 000
F7 = F3 + 5 t ha ⁻¹ compost	52,5	22,5	22,5	27,5	12	3	0,3	0,20	5 000
F8 = F4 + 5 t ha ⁻¹ compost	30	15	15	17	8	1,5	0,15	0,10	5 000

Note : N : azote ; P₂O₅ : phosphore ; K₂O : potassium ; S : soufre ; CaO : calcium ; Mg : magnésium ; Zn : zinc ; B : bore.



Fig.2a : Scarifiage



Fig.2b : Labour



Fig.2c : Billons (sans cloisons)



Fig.2d : Poquets de zaï manuel

Fig. 2 Les parcelles après la réalisation des opérations de travail du sol

Au terme de la minéralisation, les échantillons ont été placés sous hotte pour un léger refroidissement. Puis, de l'eau distillée a été ajoutée jusqu'aux 2/3 des tubes pour un second refroidissement jusqu'à température ambiante. Le minéralisant est mélangé à du carbone actif et ensuite filtré. Le N total et le P total sont déterminés à l'Auto-analyseur. Le K (Total) a été déterminé au photomètre à flamme. Le Ca total, le Mg total, le Zn total et le Fe total ont été déterminés au spectrophotomètre d'absorption atomique (AAS). Les échantillons sont dilués dans du lanthane nitrate 2000 ppm pour la lecture à l'AAS du Ca et du Mg. Les quantités totales des éléments accumulés dans les grains ont été obtenues en multipliant les teneurs des grains pour chacun des éléments par les rendements en grains du mil rapportés par Palé *et al.*, (2021). Un tableur Microsoft Excel a été utilisé pour saisir les teneurs en N, P, K, Ca, Mg, Zn et Fe des grains. Les analyses statistiques ont porté sur toutes les teneurs du grain et ont été effectuées à l'aide du logiciel SAS/STAT®, version 9.2 (SAS Institute, 2010). Les effets ont été déclarés significatifs quand le seuil de probabilité critique était $\leq 0,05$.

Obtention des quantités de minéraux accumulés dans les grains de mil

Les quantités des éléments minéraux accumulés dans les grains de mil utilisées pour les comparaisons avec celles rencontrées dans la littérature sont les grandes moyennes tirées de l'analyse de variance pour chacun des minéraux analysés au laboratoire. Par contre, les quantités des minéraux accumulés dans les grains de mil selon les précédents auteurs ont été estimées sur la base des taux d'accumulation qui ont été antérieurement rapportés et celle (base) du même rendement moyen en grains de 1 421 kg ha⁻¹ (Palé *et al.*, 2021) (Tableau 3). L'équation utilisée pour estimer les quantités des éléments minéraux accumulés dans les grains est la suivante :

Eq. 1 : **Accumulation=1421 t**, où *t* est la concentration de chaque minéral dans le grain de mil.

Calcul des quantités de minéraux pour la satisfaction des besoins nutritifs annuels des humains

Plusieurs auteurs ont mis en évidence l'importance de l'accumulation des éléments minéraux dans les grains de mil. En outre, eu égard aux importantes accumulations des éléments minéraux dans les grains de de la variété IKMP5 du mil mises en évidence dans cette étude, les grains de mil sont une source importante d'éléments minéraux pour l'alimentation humaine. Selon Songré-Ouattara *et al.* (2015), les grains de mil ont des teneurs en substances chimiques très variables et constituent ainsi un potentiel nutritionnel important pour les populations dans leurs différentes formes. Ainsi des besoins nutritifs journaliers en éléments pour couvrir les besoins des humains ont été définis et rapportés dans la littérature. Ces besoins nutritifs journaliers en N sont de 56000 mg/j pour un homme adulte, 46000 mg/j pour une femme adulte et 71000 mg/j pour une femme enceinte ou en allaitement (Trumbo *et al.*, 2002). Les apports en P rapportés sont de 700 à 750 mg/j pour un homme ou une femme adulte et de 700 mg pour une femme enceinte ou en allaitement [Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes, 1997; WARD, 2014; Deluzarche, 2018]. Aussi, il a été rapporté que, pour couvrir leurs besoins journaliers en K, les hommes et femmes adultes ont besoin de 3100 à 4700 mg/j [Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference, 2004 ; Ward, 2014 ; Deluzarche, 2018] et les femmes enceintes ou en allaitement de 4700 à 5100 mg/j (Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference, 2004). L'Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes (1997), Ward (2014) et Deluzarche (2018) ont indiqué des quantités nécessaires pour la couverture des besoins nutritifs en Ca

de l'homme ou de la femme adulte qui vont de 900 à 1200 mg/j, pendant que ceux de la femme enceinte ou en allaitement étaient de 1000 mg/j. Pour ce qui est de Mg, les recherches antérieures ont ressorti des besoins journaliers de 310 à 420 mg/j pour l'homme adulte [Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference, 2004 ; Ward, 2014 ; Deluzarche, 2018], 360 mg/j pour la femme adulte (Deluzarche, 2018). L'Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes (1997) a également indiqué que 320 à 360 mg de Mg étaient suffisants pour satisfaire aux besoins de la femme adulte ainsi que celle enceinte ou en allaitement. Les quantités journalières de Fe et Zn à apporter aux humains sont assez réduites. Les besoins journaliers en Fe vont de 8 à 9 mg/j pour l'homme adulte et de 11 à 18 mg/j pour la femme adulte (Trumbo, 2001 ; Deluzarche, 2018), de 9 mg/j pour la femme en allaitement et de 27 mg/j pour la femme enceinte (Trumbo, 2001). En outre, les besoins en Zn rapportés vont de 8 à 12 mg/j pour l'homme ou la femme adulte (Trumbo, 2001 ; Ward, 2014 ; Deluzarche, 2018) et de 11 à 12 mg/j pour la femme enceinte ou en allaitement (Trumbo, 2001). C'est sur la base de ces besoins nutritifs journaliers et de celle (base) des quantités des minéraux obtenues dans la présente étude que les besoins annuels et partant le nombre d'individus à satisfaire dans l'année ont été calculés (Tableau 4), en utilisant l'équation suivante :

Eq. 2 : $I = Q / (B \times J)$ où, *I* est le nombre d'individus, *Q* est la quantité du minéral accumulé, *B* est le besoin journalier de l'individu pour chaque minéral et *J* est le nombre de jours dans l'année (365 jours).

RESULTATS

VARIATION DES QUANTITÉS DES MINÉRAUX ACCUMULÉS DANS LES GRAINS DE MIL SELON LA LITTÉRATURE

Les estimations pour les quantités de minéraux accumulés pour 1421 kg de grains de mil ont donné des valeurs variant de 18,47 à 26,83 kg pour N (Hulseet *et al.*, 1980 ; Tielsch et Sommer, 1984; Van Duivenbooden, 1996 ; Leder, 2004 ; Husson *et al.*, 2013), de 2,56 à 5,68 kg pour P (Tielsch et Sommer, 1984 ; Van Duivenbooden, 1996 ; Husson *et al.*, 2013 ; Jideaniet *et al.*, 2013 ; Govindarajet *et al.*, 2020), de 3,13 à 6,39 kg pour K (Van Duivenbooden, 1996 ; Husson *et al.*, 2013; Jideaniet *et al.*, 2013; Govindarajet *et al.*, 2020), de 0,14 à 0,60 kg pour Ca (Hulse *et al.*, 1980 ; Tielsch et Sommer, 1984 ; Van Duivenbooden, 1996 ; Leder, 2004 ; Husson *et al.*, 2013; Jideani *et al.*, 2013; Govindarajet *et al.*, 2020), de 0,16 à 2,13 kg pour Mg (Hulse *et al.*, 1980 ; Tielsch et Sommer, 1984 ; Van Duivenbooden, 1996 ; Husson *et al.*, 2013; Jideani *et al.*, 2013; Govindaraj *et al.*, 2020), de 0,04 à 0,07 kg pour Zn (Tielsch et Sommer, 1984 ; Jideaniet *et al.*, 2013; Kadivala *et al.*, 2018 ; Govindaraj *et al.*, 2020) et de 0,04 à 0,11 kg pour Fe (Tielsch et Sommer, 1984 ; Leder, 2004, Jideani *et al.*, 2013; Kadivala *et al.*, 2018; Govindaraj *et al.*, 2020) (Tableau 3).

BESOINS JOURNALIERS EN MINÉRAUX ET EFFECTIF DES HOMMES ET FEMMES AUX BESOINS ANNUELS SATISFAITS

Les résultats ont montré que les effectifs des hommes et femmes adultes dont les besoins annuels en N,P, K, Ca, Mg et Zn sont satisfaits sont pratiquement les mêmes (Tableau 4). Cependant, une grande différence a été observée pour Fe avec 76 hommes adultes contre 38 femmes adultes.

Les résultats ont également montré que les effectifs des femmes enceintes ou en allaitement dont les besoins annuels sont satisfaits pour N, P, K, Ca, Mg et Zn sont équivalents (Tableau 5). Par contre, pour le minéral Fe, le nombre de femmes en allaitement (76) aux besoins annuels couverts est très supérieur à celui des femmes enceintes (25).

Tableau 3. Quantités d'éléments minéraux accumulées par les grains du mil, calculées sur la base des taux d'exportations rapportés et sur upar les différents auteurs et le rendement en grains moyen du mil

Auteur	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Fe
	----- Kg -----						
Palé et al. (2022)	27,75	4,94	8,51	0,28	1,38	0,16	0,25
Kadivala et al. (2018)	-	-	-	-	-	0,06	0,10
Hulse et al. (1980)	26,83	-	-	0,60	0,16	-	-
Tielsch et Sommer (1984)	26,37	4,21	-	0,60	1,95	0,04	0,11
IrenLeder (2004) & NIN (2003)	25,01	-	-	0,36	-	-	0,04
Van Duivenbooden (1996)	18,47	2,56	4,26	0,28	1,14	-	-

Tableau 4. Besoins journaliers en minéraux et effectif des hommes et femmes aux besoins annuels satisfaits

Elément	Quantité du Minéral accumulé dans le grain (mg)	Besoin journalier minimal (mg/j)	Besoin journalier maximal (mg/j)	Total jours/année	Effectif minimal	Effectif maximal	
							Homme adulte
N	27750000	-	56000	365	-	1	
P	4940000	700	750	365	19	18	
K	8510000	3100	4700	365	8	5	
Ca	280000	900	1200	365	1	1	
Mg	1380000	310	420	365	12	9	
Zn	160000	8	12	365	55	37	
Fe	250000	8	9	365	86	76	
	Femme adulte						
N	27750000	-	56000	365	-	2	
P	4940000	700	750	365	19	18	
K	8510000	3100	4700	365	8	5	
Ca	280000	900	1200	365	1	1	
Mg	1380000	320	420	365	12	11	
Zn	160000	8	12	365	55	37	
Fe	250000	11	9	365	62	38	

Tableau 5. Besoins journaliers en minéraux et effectif des femmes enceintes ou en allaitement aux besoins annuels satisfaits

Elément	Quantité du Minéral accumulé dans le grain (mg)	Besoin journalier minimal (mg/j)	Besoin journalier maximal (mg/j)	Total jours/année	Effectif minimal	Effectif maximal	
							Femme enceinte
N	27750000	-	71000	365	-	1	
P	4940000	-	700	365	-	19	
K	8510000	4700	5100	365	5	5	
Ca	280000	-	1000	365	-	1	
Mg	1380000	320	360	365	12	11	
Zn	160000	11	12	365	40	37	
Fe	250000	-	27	365	-	25	
	Femme en allaitement						
N	27750000	-	71000	365	-	1	
P	4940000	-	700	365	-	19	
K	8510000	4700	5100	365	5	5	
Ca	280000	-	1000	365	-	1	
Mg	1380000	320	360	365	12	11	
Zn	160000	11	12	365	40	37	
Fe	250000	-	9	365	-	76	

EFFETS DES FACTEURS TESTÉS ET VARIATIONS DES QUANTITÉS DES MINÉRAUX ACCUMULÉS DANS LES GRAINS DE MIL

Les résultats de l'analyse des variances (ANOVA) ont montré qu'aucun effet isolé du travail du sol ou de la fertilisation sur les quantités des éléments minéraux accumulés dans les grains de mil n'a été significatif. L'ANOVA a plutôt indiqué que les quantités des minéraux accumulés ont été influencées par les effets interactifs de l'année (An) et du travail du sol (TS) (Tableau 6), du TS et de la fertilisation (F) (Tableaux 7&8) et enfin de An et de F (Tableau 9). Les valeurs reportées dans les tableaux 6 à 9 sont liées aux rendements en grains du mil pour les différents facteurs étudiés.

Effets interactifs An x TS et variations des quantités des macroéléments N, P, K, Ca et Mg accumulés dans les grains du mil

Les résultats d'ANOVA ont montré que sur les deux campagnes agricoles, le scarifiage et le labour ont significativement affecté les quantités de N et de P accumulés dans les grains de mil (Tableau 5).

Cependant, en année de faible pluviométrie comme celle enregistrée en 2018, le zaï manuel a favorisé l'augmentation significative de ces deux macroéléments. En 2018 (année de faible pluviométrie) comme en 2019 (année de forte pluviométrie), l'augmentation significative des quantités de K et de Mg a été observée dans les parcelles sur lesquelles le labour a été appliqué comme méthode de travail du sol. Cependant, les résultats ont montré un effet positif du scarifiage sur les quantités de K accumulées en année de faible pluviométrie.

En moyenne, l'année 2019 a été plus favorable quant à l'augmentation des quantités de minéraux accumulés dans les grains de mil pour ces macroéléments. Comparativement à l'année de faible pluviométrie, les baisses en quantités moyennes annuelles de macroéléments accumulés en 2019 sont de 17% pour N, 28% pour P, 37% pour K, 46% pour Ca et 45% pour Mg. Les moyennes des quantités des minéraux accumulés pour chacun des travaux du sol ont montré que le labour est la principale méthode de travail du sol qui a permis une accumulation des quantités de minéraux plus élevées.

Tableau 6. Effet interactif de l'année (An) et du travail du sol (TS) sur l'accumulation d'éléments minéraux dans les grains du mil, Saria, Burkina Faso. [Probabilités (P) de l'analyse de variance : $N_{An*TS} = 0,1$, $N_{An} = 0,64$, $N_{TS} = 0,51$; $P_{An*TS} < 0,01$, $P_{An} = 0,12$, $P_{TS} = 0,62$; $K_{An*TS} = 0,01$, $K_{An} = 0,29$, $K_{TS} = 0,59$; $Ca_{An*TS} < 0,01$, $Ca_{An} = 0,04$, $Ca_{TS} = 0,10$; $Mg_{An*TS} < 0,01$, $Mg_{An} = 0,04$, $Mg_{TS} = 0,57$; $Fe_{An*TS} = 0,04$, $Fe_{An} = 0,03$, $Fe_{TS} = 0,87$]

Travail du sol	2018			2019		
	N	P	Moyenne	N	P	Moyenne
	Kg					
Scarifiage	26 ^{aB}	36 ^{aA}	31 ^a	4,31 ^{aB}	7,00 ^{aA}	5,55 ^{ab}
Zaï manuel	25 ^{aA}	28 ^{bA}	27 ^b	4,08 ^{aB}	5,77 ^{bA}	4,92 ^b
Labour	29 ^{aB}	37 ^{aA}	33 ^a	4,56 ^{aB}	6,77 ^{aA}	5,66 ^a
Billonnage cloisonné	20 ^{bA}	19 ^{cA}	20 ^c	3,60 ^{aA}	3,61 ^{cA}	3,61 ^c
Moyenne	25 ^B	30 ^A		4,14 ^B	5,73 ^A	
	K					
Scarifiage	6,62 ^{abB}	12,13 ^{aA}	9,38 ^{ab}	0,23 ^{aB}	0,44 ^{bA}	0,34 ^{ab}
Zaï manuel	6,76 ^{abB}	10,19 ^{bA}	8,48 ^b	0,19 ^{abB}	0,40 ^{bA}	0,30 ^b
Labour	7,47 ^{aB}	12,33 ^{aA}	9,90 ^a	0,22 ^{abB}	0,52 ^{aA}	0,37 ^a
Billonnage cloisonné	5,44 ^{bA}	6,97 ^{cA}	6,21 ^c	0,15 ^{bA}	0,12 ^{cB}	0,14 ^c
Moyenne	6,57 ^B	10,41 ^A		0,20 ^B	0,37 ^A	
	Mg					
Scarifiage	1,00 ^{abB}	1,95 ^{abA}	1,48 ^b	0,20 ^{aB}	0,36 ^{aA}	0,29 ^a
Zaï manuel	0,98 ^{abB}	1,82 ^{bA}	1,40 ^b	0,18 ^{aA}	0,26 ^{abA}	0,22 ^a
Labour	1,13 ^{aB}	2,23 ^{aA}	1,68 ^a	0,20 ^{aB}	0,34 ^{aA}	0,27 ^a
Billonnage cloisonné	0,80 ^{bB}	1,09 ^{cA}	0,95 ^c	0,24 ^{aA}	0,18 ^{bA}	0,21 ^a
Moyenne	0,98 ^B	1,78 ^A		0,21 ^B	0,29 ^A	

Note : Les valeurs suivies de la même lettre en majuscule dans une même ligne et en minuscule dans une même colonne ne sont pas significativement différentes à $p \leq 0,05$.

Tableau 7. Effet interactif du travail du sol (TS) et de la fertilisation (F) sur l'accumulation de N et de P dans les grains du mil, Saria, Burkina Faso. [Probabilités de l'analyse de variance : $N_{TS*F} = 0,01$, $N_{TS} = 0,51$, $N_F = < 0,01$; $P_{TS*F} = 0,01$, $P_{TS} < 0,01$, $P_F < 0,01$]

Fertilisation	Travail du sol					Contraste		AA-CP (%)
	Scarifiage	Zaï manuel	Labour	Billonnage cloisonné	Moyenne	Type	Pr	
	N (Kg)							
F1 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	37 ^{aB}	11 ^{cB}	34 ^{aA}	10 ^{bB}	23 ^b	FM vs FM+CP	< 0,01	
F2 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	25 ^{bAB}	28 ^{bAB}	29 ^{aA}	18 ^{abB}	25 ^b	F1 vs F6	0,02	22
F3 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	26 ^{bAB}	18 ^{bcB}	31 ^{aA}	21 ^{abAB}	24 ^b	F2 vs F5	0,01	20
F4 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	31 ^{abAB}	22 ^{bcB}	33 ^{aA}	17 ^{abB}	26 ^b	F3 vs F7	0,01	21
F5 = F2 + 5 t ha ⁻¹ compost	31 ^{abAB}	32 ^{abAB}	37 ^{aA}	25 ^{abB}	31 ^a	F4 vs F8	< 0,01	22
F6 = F1 + 5 t ha ⁻¹ compost	32 ^{abA}	30 ^{abA}	29 ^{aA}	26 ^{aA}	29 ^{ab}			
F7 = F3 + 5 t ha ⁻¹ compost	31 ^{abA}	37 ^{abA}	39 ^{aA}	16 ^{bB}	31 ^a			
F8 = F4 + 5 t ha ⁻¹ compost	37 ^{aA}	38 ^{aA}	31 ^{abB}	25 ^{abB}	33 ^a			
Moyenne	31 ^A	27 ^B	33 ^A	20 ^C				
	P (Kg)							
F1 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	5,88 ^{aA}	2,40 ^{cB}	5,19 ^{bA}	1,69 ^{bB}	3,79 ^b	FM vs FM+CP	< 0,01	
F2 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	3,85 ^{bA}	4,84 ^{bA}	4,77 ^{bA}	3,21 ^{aA}	4,17 ^b	F1 vs F6	0,01	26
F3 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	5,37 ^{abA}	3,11 ^{bcB}	4,78 ^{abAB}	4,53 ^{aAB}	4,45 ^b	F2 vs F5	< 0,01	26
F4 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	5,66 ^{abA}	3,72 ^{bcB}	5,41 ^{abAB}	3,69 ^{abB}	4,62 ^b	F3 vs F7	< 0,01	24
F5 = F2 + 5 t ha ⁻¹ compost	5,47 ^{abAB}	5,73 ^{abAB}	6,88 ^{bA}	4,60 ^{abB}	5,67 ^a	F4 vs F8	0,01	20
F6 = F1 + 5 t ha ⁻¹ compost	5,22 ^{abA}	5,70 ^{abA}	5,29 ^{abA}	4,24 ^{aA}	5,11 ^b			
F7 = F3 + 5 t ha ⁻¹ compost	6,18 ^{aA}	6,80 ^{abA}	7,65 ^{abA}	2,94 ^{abB}	5,89 ^a			
F8 = F4 + 5 t ha ⁻¹ compost	6,80 ^{aA}	7,12 ^{aA}	5,35 ^{abB}	3,93 ^{abB}	5,80 ^a			
Moyenne	5,55 ^{AB}	4,92 ^B	5,67 ^A	3,61 ^C				

Note : Les valeurs suivies de la même lettre en majuscule dans une même ligne et en minuscule dans une même colonne ne sont passignificativement différentes à $p \leq 0,05$. FM : Fumure minérale ; FM+CP : Fumure minérale + Compost ; AA-CP : Accumulation additionnelle due au compost ; Pr : probabilité.

Les augmentations des quantités des minéraux ont été de 2 à 13 kg pour N, 0,11 à 2,05 kg pour P, 0,52 à 3,69 kg pour K, 0,3 à 0,23 kg pour Ca et de 0,2 à 0,73 kg pour Mg et ce selon les différentes méthodes de travail du sol. Il faut ajouter qu'en plus du labour, le scarifiage a permis une augmentation des quantités de N accumulées dans les grains du mil.

Effets interactifs An x TS et variations des quantités du microélément Fe accumulées dans les grains du mil

Les résultats de l'étude ont montré une stabilité des quantités de Fe accumulées dans les grains du mil pour tous les travaux du sol sur les deux années (Tableau 6). Il est ressorti néanmoins qu'en 2019, une plus faible quantité de Fe accumulée a été enregistrée dans les parcelles de billonnage cloisonné. Les moyennes annuelles des travaux de sol ont montré que l'année 2019 a été plus favorable pour une plus forte accumulation des quantités de Fe avec une augmentation de 28% comparativement à l'année 2018 de faible pluviométrie.

Effets interactifs TS x F et variations des quantités des macroéléments N, P, K, et Mg accumulés dans les grains du mil

De manière générale, les parcelles qui ont reçu les combinaisons d'engrais minéraux et de compost ont connu des accumulations en éléments minéraux plus importantes que celles sur lesquelles les seuls engrais minéraux ont été appliqués (Tableau 7).

Variations de N

Les résultats ont montré que l'utilisation du labour a permis une stabilité des quantités de N accumulées sur tous les niveaux de fertilisation. Dans les parcelles de zaï, les plus fortes accumulations ont été obtenues avec l'application de la fumure F8 comparativement aux autres formules de fertilisation. L'application de la fumure F8 dans les parcelles de scarifiage a favorisé une quantité de N accumulée plus élevée. Quand la fertilisation F6 a été appliquée dans les parcelles sur lesquelles le billonnage cloisonné a été utilisé comme travail du sol, les accumulations de N dans les grains du mil

Tableau 8. Effet interactif du travail du sol (TS) et de la fertilisation (F) sur l'accumulation de K et de Mg dans les grains du mil, Saria, Burkina Faso. [Probabilités de l'analyse de variance : $K_{TS \times F} < 0,01$, $K_{TS} = 0,59$, $K_F < 0,01$; $Mg_{TS \times F} < 0,01$, $Mg_{TS} = 0,57$, $Mg_F = 0,01$]

Fertilisation	Travail du sol					Contraste		
	Scarifiage	Zai manuel	Labour	Billonnage cloisonné	Moyenne	Type	Pr	AA-CP (%)
	K (Kg)							
F1 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	10,40 ^{abA}	3,81 ^{cb}	9,49 ^{bA}	2,64 ^{bB}	6,59 ^b	FM vs FM+CP	< 0,01	
F2 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	6,30 ^{bA}	8,29 ^{bA}	8,85 ^{bA}	5,40 ^{abA}	7,21 ^b	F1 vs F6	0,03	24
F3 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	9,26 ^{abA}	5,62 ^{bcB}	9,76 ^{bA}	7,75 ^{abB}	8,10 ^b	F2 vs F5	0,01	23
F4 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	8,36 ^{bA}	6,30 ^{bcA}	9,05 ^{bA}	6,82 ^{aA}	7,63 ^b	F3 vs F7	0,01	21
F5 = F2 + 5 t ha ⁻¹ compost	9,02 ^{abAB}	9,80 ^{abAB}	11,4 ^{abA}	7,26 ^{ab}	9,37 ^{ab}	F4 vs F8	< 0,01	25
F6 = F1 + 5 t ha ⁻¹ compost	9,64 ^{abA}	10,18 ^{abA}	7,52 ^{bA}	8,15 ^{aA}	8,62 ^{ab}			
F7 = F3 + 5 t ha ⁻¹ compost	10,94 ^{abA}	11,86 ^{aA}	13,5 ^{aA}	4,78 ^{abB}	10,27 ^a			
F8 = F4 + 5 t ha ⁻¹ compost	12,10 ^{aA}	11,96 ^{aA}	9,64 ^{abB}	6,87 ^{ab}	10,14 ^a			
Moyenne	9,50 ^{AB}	8,48 ^B	9,90 ^A	6,21 ^C				
	Mg (Kg)							
F1 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	1,3 ^{cAB}	0,69 ^{cb}	1,61 ^{bA}	0,43 ^{cb}	1,00 ^c	FM vs FM+CP	< 0,01	
F2 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	1,91 ^{bA}	1,41 ^{bA}	1,45 ^{bA}	0,73 ^{cA}	1,13 ^c	F1 vs F6	< 0,01	31
F3 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	1,26 ^{cAB}	0,93 ^{bcB}	1,51 ^{bA}	1,06 ^{abAB}	1,19 ^{bc}	F2 vs F5	< 0,01	29
F4 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	1,23 ^{cAB}	1,09 ^{bcAB}	1,58 ^{bA}	0,92 ^{abB}	1,20 ^{bc}	F3 vs F7	< 0,01	30
F5 = F2 + 5 t ha ⁻¹ compost	1,64 ^{cAB}	1,65 ^{abAB}	1,89 ^{bA}	1,24 ^{abB}	1,60 ^{ab}	F4 vs F8	< 0,01	31
F6 = F1 + 5 t ha ⁻¹ compost	1,54 ^{cA}	1,57 ^{abA}	1,33 ^{bA}	1,37 ^{aA}	1,45 ^b			
F7 = F3 + 5 t ha ⁻¹ compost	1,71 ^{cb}	1,87 ^{abB}	2,47 ^{aA}	0,75 ^{bc}	1,70 ^{ab}			
F8 = F4 + 5 t ha ⁻¹ compost	2,23 ^{aA}	2,01 ^{abB}	1,63 ^{bB}	1,05 ^{abC}	1,73 ^a			
Moyenne	1,60 ^B	1,40 ^B	1,68 ^A	0,94 ^C				

Note : Les valeurs suivies de la même lettre en majuscule dans une même ligne et en minuscule dans une même colonne ne sont pas significativement différentes à $p \leq 0,05$. FM : Fumure minérale ; FM+CP : Fumure minérale + Compost ; AA-CP : Accumulation additionnelle due au compost ; Pr : probabilité.

Tableau 9. Effet interactif de l'année (An) et de la fertilisation (F) sur l'accumulation de Mg par les grains du mil, Saria, Burkina Faso. [Probabilités de l'analyse de variance : $Mg_{An \times F} = 0,03$, $Mg_{An} = 0,04$, $Mg_F < 0,01$]

Fertilisation	2018			2019			Moyenne			Contraste		
									Type	Pr	AA-CP (%)	
	Kg											
F1 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	0,70 ^{bB}	1,32 ^{cA}	1,00 ^c	0,70 ^{bB}	1,32 ^{cA}	1,00 ^c	0,70 ^{bB}	1,32 ^{cA}	1,00 ^c	FM vs FM+CP	< 0,01	
F2 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée (46 N)	0,96 ^{abB}	1,31 ^{cA}	1,13 ^c	0,96 ^{abB}	1,31 ^{cA}	1,13 ^c	0,96 ^{abB}	1,31 ^{cA}	1,13 ^c	F1 vs F6	< 0,01	25
F3 = 150 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 100 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	0,82 ^{abB}	1,57 ^{bcA}	1,19 ^{bc}	0,82 ^{abB}	1,57 ^{bcA}	1,19 ^{bc}	0,82 ^{abB}	1,57 ^{bcA}	1,19 ^{bc}	F2 vs F5	< 0,01	36
F4 = 100 kg ha ⁻¹ de NPK-S-CaO + 50 kg ha ⁻¹ d'Urée 30	0,87 ^{abB}	1,53 ^{bcA}	1,20 ^{bc}	0,87 ^{abB}	1,53 ^{bcA}	1,20 ^{bc}	0,87 ^{abB}	1,53 ^{bcA}	1,20 ^{bc}	F3 vs F7	< 0,01	33
F5 = F2 + 5 t ha ⁻¹ compost	1,16 ^{ab}	2,04 ^{abA}	1,60 ^{ab}	1,16 ^{ab}	2,04 ^{abA}	1,60 ^{ab}	1,16 ^{ab}	2,04 ^{abA}	1,60 ^{ab}	F4 vs F8	< 0,01	35
F6 = F1 + 5 t ha ⁻¹ compost	1,13 ^{ab}	1,76 ^{bA}	1,45 ^b	1,13 ^{ab}	1,76 ^{bA}	1,45 ^b	1,13 ^{ab}	1,76 ^{bA}	1,45 ^b			
F7 = F3 + 5 t ha ⁻¹ compost	1,06 ^{abB}	2,34 ^{aA}	1,70 ^{ab}	1,06 ^{abB}	2,34 ^{aA}	1,70 ^{ab}	1,06 ^{abB}	2,34 ^{aA}	1,70 ^{ab}			
F8 = F4 + 5 t ha ⁻¹ compost	1,12 ^{ab}	2,34 ^{aA}	1,73 ^a	1,12 ^{ab}	2,34 ^{aA}	1,73 ^a	1,12 ^{ab}	2,34 ^{aA}	1,73 ^a			
Moyenne	0,98 ^B	1,78 ^A		0,98 ^B	1,78 ^A		0,98 ^B	1,78 ^A				

Note : Les valeurs suivies de la même lettre en majuscule dans une même ligne et en minuscule dans une même colonne ne sont pas significativement différentes à $p \leq 0,05$. FM : Fumure minérale ; FM+CP : Fumure minérale + Compost ; AA-CP : Accumulation additionnelle due au compost ; Pr : probabilité

Tableau 10. Corrélations (Pearson) entre les rendements grain et les quantités des minéraux accumulés dans les grains du mil à Saria, Burkina Faso

	Rendement grain	N	P	K	Ca	Mg	Fe
N	0,88**						
P	0,93**	0,86**					
K	0,89**	0,87**	0,94**				
Ca	0,79**	0,67**	0,71**	0,72**			
Mg	0,86**	0,74**	0,88**	0,90**	0,79**		
Fe	0,60**	0,61**	0,62**	0,57**	0,42**	0,51**	
Zn	0,34**	0,22**	0,36**	0,38**	0,24**	0,42**	0,33**

**Significatif à $P \leq 0,01$.

ont été plus importantes comparativement aux autres formules et particulièrement au témoin F1 qui a connu la plus faible quantité de N accumulée. Les moyennes des fertilisations calculées sur chaque travail du sol ont laissé observer des quantités additionnelles de N accumulées principalement dans les parcelles recevant les combinaisons de fertilisants minéraux et de compost. Comparativement à la fertilisation témoin F1, ces quantités additionnelles sont de 1,88 kg pour F5 et de 2,10 kg pour F7 et F8. Les moyennes des travaux du sol calculées sur chaque niveau de fertilisation ont indiqué des plus fortes accumulations de N dans les parcelles où le scarifiage et le labour ont été appliqués comme méthodes de travail du sol. Les accumulations d'éléments minéraux dues à l'application des seuls engrais minéraux comparée aux fertilisations combinant les engrais minéraux et le compost font remarquer des gains additionnels dus au compost allant de 20 à 22%

suivant la formule et la dose de l'engrais minéral auquel le compost a été adjoint.

Variations de P

Comparativement au témoin F1, les résultats de l'étude laissent observer un accroissement des quantités en P accumulées avec l'application de fertilisants minéraux combinés au compost de façon générale et particulièrement avec la combinaison F8 (Tableau 7). Une stabilité des accumulations a été observée pour toutes les méthodes de travail du sol quand les formules de fertilisations F2 et F6 étaient utilisées pour la production du grain du mil. Les résultats ont montré qu'aucune différence significative n'a existé entre les niveaux de fertilisation, exception faite des plus faibles accumulations de P rencontrées dans les parcelles F1 (témoin). Les moyennes des accumulations des travaux du sol, calculées pour chaque niveau de

fertilisation ont laissé observer des valeurs de P plus élevées dans les parcelles labourées comparativement aux autres travaux du sol, avec une différence allant de 0,12 à 2 kg suivant la méthode de travail utilisée. Les moyennes des fertilisations calculées pour chaque méthode de travail du sol ont montré des valeurs de P plus élevées dans les parcelles qui ont reçu les fertilisations F5, F7 et F8 qui sont toutes des combinaisons d'engrais minéraux et de compost. Comparativement au témoin F1, ces fertilisations ont permis des accroissements dans les quantités de P accumulées qui sont de 1,88% pour F5, 2,1% pour F7 et 2,01% pour F8. Une comparaison des accumulations des minéraux dues à l'application des seuls engrais minéraux par rapport aux fertilisations combinant les engrais minéraux et le compost a laissé observer des accumulations additionnelles dues au compost allant de 20 à 26% suivant la formule et la dose de l'engrais minéral auquel le compost a été adjoint.

Variations de K

Les analyses statistiques ont montré que, exception faite des parcelles labourées, les quantités de K accumulées dans les grains de mil sont en général plus élevées dans toutes les parcelles de travail du sol quand la fumure minérale du type F8 était appliquée (Tableau 8). Il résulte des analyses que l'utilisation de la fumure F1 ou témoin engendrait des quantités de K plus faibles indépendamment de la méthode de travail du sol utilisée. Exception faite de la fumure F1 et F8 qui ont eu des effets différents, les résultats ont montré une stabilité des accumulations pour chaque fumure à travers les quatre méthodes de travail du sol. Les moyennes des accumulations dans les travaux du sol calculées sur les niveaux de fertilisation font remarquer des valeurs plus élevées dans les parcelles labourées et de plus faibles dans les parcelles sur lesquelles les billons cloisonnés étaient utilisés. L'utilisation des fumures F7 et F8 ont permis de plus fortes accumulations de K pendant que les plus faibles ont été enregistrées avec l'application de la fumure F1 ou témoin. Une comparaison des accumulations de K dues à l'application des seuls engrais minéraux par rapport aux fumures combinant les engrais minéraux et le compost a laissé observer des accumulations additionnelles dues au compost allant de 21 à 25% suivant la formule et la dose de l'engrais minéral auquel le compost a été adjoint.

Variations de Mg

Les résultats de l'étude ont montré que les quantités de Mg accumulées dans les grains de mil ont été plus élevées avec l'application des fumures F8 dans les parcelles scarifiées et de zaï, F7 dans les parcelles labourées et F6 dans les billons cloisonnés (Tableau 8). Il résulte des analyses que l'utilisation de la fumure F1 ou témoin engendrait les plus faibles quantités de K accumulées indépendamment de la méthode de travail du sol utilisée. Les seules fumures qui ont permis une stabilité des quantités de Mg accumulées à travers les méthodes de travail du sol furent les fumures du type F2 et F6. Comme pour K, les moyennes des accumulations dans les travaux du sol calculées sur les niveaux de fertilisation font remarquer des valeurs plus élevées dans les parcelles labourées et de plus faibles dans les parcelles sur lesquelles les billons cloisonnés étaient utilisés. Quand le compost a été adjoint aux engrais minéraux, les résultats ont montré que les quantités additionnelles de Mg accumulées dans les grains du mil du fait de la présence de ce type de fumure variaient de 29 à 31% suivant la formule de la fumure minérale.

Effets interactifs An x F et variations des quantités du macroélément Mg accumulés dans les grains du mil

Les résultats ont montré qu'en année de faible pluviométrie soit 2018, les accumulations de Mg les plus élevées ont été enregistrées dans

les parcelles qui avaient reçu les fertilisations F5, F6 et F8 (Tableau 9). Par contre, en 2019 ou année de forte pluviométrie, les accumulations pour ce macroélément ont été plus élevées avec l'application des formules de fertilisation F7 et F8. De plus faibles valeurs ont été enregistrées dans les parcelles F1 (ou témoin) en 2018 et dans les parcelles sur lesquelles étaient appliquées les fertilisations F1 et F2 en 2019. Les moyennes des quantités des minéraux accumulés pour chaque niveau de fertilisation à travers les années ont montré des valeurs plus élevées avec la fumure F8 dont les différences des accumulations sont de 0,73 kg plus élevées par rapport au témoin F1 et de 0,6 kg par rapport à la fumure F2. Les moyennes des accumulations calculées pour chaque niveau de fertilisation sur l'année ont montré des valeurs de Mg plus élevées en année de plus forte pluviométrie. Il a été également observé que l'ajout du compost avait induit des quantités de Mg accumulées plus importantes que dans les parcelles ayant reçu seulement les engrais minéraux avec une variation de 25 à 36% suivant le niveau de fertilisation minérale considéré.

CORRELATIONS

Les résultats d'analyse de corrélation (Pearson) ont montré que le rendement grain (Palé *et al.*, 2021) a été positivement associé aux quantités des minéraux accumulés pour tous les éléments minéraux ($P \leq 0,01$) (Tableau 10).

DISCUSSION

L'accumulation des éléments minéraux dans les grains de la variété IKMP5 du mil a été affectée par les effets du travail du sol et de la fertilisation ainsi que l'interaction de ces deux facteurs. Les résultats obtenus montrent que la fertilisation organo-minérale des parcelles labourées et scarifiées a optimisé l'accumulation des éléments minéraux dans les grains de mil. Le labour et le scarifiage auraient contribué à améliorer le prélèvement des éléments minéraux du sol et leur accumulation dans les grains. Il est bien établi que le travail du sol améliore les propriétés du sol notamment physiques (structure) et la fertilisation organo-minérale apporte les éléments minéraux aux plants, ce qui aurait favorisé l'assimilation de ces minéraux par les plants et leur bon développement (Hien, 2004 ; CILSS, 2012). En effet, la fertilité du sol est améliorée et les éléments minéraux sont mis à la disposition des plants, ce qui aurait favorisé leur accumulation dans les organes de ces derniers notamment dans les grains (Giroux *et al.*, 2000 ; Gianaet *et al.*, 2017). Les résultats obtenus dans la présente étude ont montré que les quantités des minéraux accumulés dans les grains du mil produits sur un ha étaient de 27,75 kg pour N, 4,94 kg pour P, 8,51 kg pour K, 0,28 kg pour Ca, 1,38 kg pour Mg, 0,16 kg pour Zn et 0,25 pour kg Fe. Ces quantités de N, K, Ca, Zn et Fe accumulées dans les grains de mil sont alors supérieures à celles rapportées par les auteurs suscités excepté Hulse *et al.*, (1980). Cependant, Tielsch et Sommer (1984) et Leder (2004) ont rapporté des valeurs de Ca plus élevées que celles obtenues dans la présente investigation. Les quantités de Ca obtenues dans la présente étude laissent observer une nette infériorité comparativement à celles rapportées par Hulse *et al.* (1980), Tielsch et Sommer (1984) et Leder (2004), par contre supérieures ou égales à celles des autres auteurs. Les résultats ont également montré qu'en dehors des résultats rapportés par Hulse *et al.*, (1980) et Van Duivenbooden (1996), les quantités de Mg issues de la présente étude ont été plus faibles. Ce résultat corrobore ceux obtenus par Giroux *et al.*, (2000) qui ont montré que les engrais azotés et potassiques ont des effets antagonistes importants sur les teneurs en Ca et Mg des organes du foin d'une prairie à dominance de mil et accroissent de façon substantielle le rapport K/Ca + Mg. Comparativement aux quantités obtenues dans cette étude, les

quantités de P rapportées par Husson *et al.* (2013) et Govindaraj *et al.* (2020) ont montré une supériorité pendant que celles des autres auteurs sont plus faibles. Se référant alors quantités des minéraux contenus dans les grains du mil obtenus dans la présente investigation et aux maxima des besoins journaliers pour les hommes comme les femmes, il ressort que les quantités de N, K et Ca n'ont permis de couvrir que les besoins annuels de très faibles effectifs d'hommes ou de femmes. Ceci implique donc que des études approfondies sont nécessaires pour augmenter les quantités de ces minéraux par des productions plus élevées ou des teneurs en minéraux plus conséquentes dans les grains, ou encore des apports complémentaires à partir d'autres sources alimentaires pour combler les déficits.

CONCLUSION

Les effets du travail du sol et de la fertilisation organo-minérale sur la capacité de la variété IKMP5 du mil à accumuler les éléments minéraux dans les grains ont été étudiés. Les quantités des éléments accumulés dans les grains de mil ont été affectées par l'effet du travail du sol et de la fertilisation ainsi que par leur effet interactif. L'ajout du compost aux fumures minérales a révélé une efficacité des formules combinant la matière organique (compost) aux différentes doses de fumures minérales permettant d'obtenir des quantités additionnelles de minéraux accumulés dans les grains allant de 20 à 36%, suivant l'élément minéral considéré. Les résultats obtenus révèlent que le labour et le scarifiage ont favorisé des accumulations fortes et stables comparativement au zaï manuel et au billonnage cloisonné. Au regard des résultats obtenus, des études approfondies sont nécessaires pour augmenter les quantités des minéraux par des productions plus élevées ou des teneurs en minéraux plus conséquentes dans les grains, ou encore des apports complémentaires à partir d'autres sources alimentaires pour combler les déficits.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) du Burkina Faso, le Programme d'Amélioration de la Productivité Agricole des Petits Exploitants pour l'Afrique Sub-saharienne (SAPEP) et le Programme de Laboratoire d'Innovation et d'Intensification Durable (accord de coopération n° AID-OAA-L-14-00006) (SIIL-Burkina) pour leurs soutiens administratifs, financiers et matériels pour la réalisation de l'étude.

REFERENCES

- Anuradha, N., Tara Satyavathi, C., Meena, M. C., Mukesh Shankar, S., Bhardwaj, C., Bhat, J., Singh, O. & Singh, S. (2017). Evaluation of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] for grain iron and zinc content in different agro climatic zones of India. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 77(1), 65-73. DOI: 10.5958/0975-6906.2017.00009.8.
- Békoye, M. B. (2011). Caractérisation chimique et minérale des grains de mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] de Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(5), 2039-2044. DOI: 10.4314/ijbcs.v5i5.25.
- CILSS (Comité permanent Inter- États de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel). (2012). *Bonnes pratiques agro-sylvo-pastorales d'amélioration durable de la fertilité des sols au Burkina Faso*, 194p.
- Comité National des Semences. (2014). *Catalogue national des espèces et variétés agricoles du Burkina Faso*. Ouagadougou, Burkina Faso. 81p.
- Deluzarche, C. (2018). Le tableau des apports journaliers recommandés en minéraux. Accessible à <https://www.futura-sciences.com/sante/questions-reponses/nutrition-mineraux-sont-apports-journaliers-recommandes-9355>.
- FAO. (2014). FAOSTAT data base. Online at <http://faostat.fao.org/site/5676/DesktopDefault.aspx>
- Giana, G. K., Sharma, O. P., Shivran, A. C., Boori, P. K., & Meena, S. S. (2017). Productivity and nutrient uptake of pearl millet influenced by intercropping with legumes and fertility level. *Research in Environment and Life Sciences*, 10(3): 209-212.
- Giroux, M., Morin, R., & Lemieux, M. (2000). Effets de la fertilisation N, P et K et leurs interactions sur le rendement d'une prairie à dominance de mil (*Phleum pratense* L.), la teneur en éléments nutritifs de la récolte et l'évolution de la fertilité des sols. *Agrisol*, 11(1): 41-46.
- Govindaraj, M., Rai, K. N., Kanatti, A., Hari, D. U., Harshad, S., & Rao, A. S. (2020). Exploring the genetic variability and diversity of pearl millet core collection germplasm for grain nutritional traits improvement. *Scientific Reports*, 10, 21177 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77818-0>.
- Hien, E., 2004. Dynamique du carbone dans un Acrisol ferrique du Centre-Ouest Burkina : Influence des pratiques culturales sur le stock et la qualité de la matière organique. Thèse de doctorat en Sciences des Sols, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France. 138p.
- Hulse, J. H., Laing, E. M., & Pearson, O. E. (1980). Sorghum and the millets: their composition and nutritive value. Accessible à <http://hdl.handle.net/10625/3671>.
- Husson, O., Séguy, L., Charpentier, H., Rakotondramanana, M. P., Raharison, T., Naudin, K., Enjalric, F., Moussa, N., Razanamparany, C., Rasolomanjaka, J., Bouzinac, S., Chabanne, A., Boulakia, S., Tivet, F., Chabierski, S., Razafintsalama, H., Rakotoarivo, C., Andrianasolo, H. M., Chabaud, F.-X., Rakotondralambo, T., Rakotondralambo, P., & Ramarison, I. (2013). Manuel pratique du Semis direct sur couverture végétale permanente (SCV). Application à Madagascar. Antananarivo : GSDM-CIRAD, 716 p.
- IFDC. (2018). *Recommandations 2018 d'engrais pour l'Afrique de l'Ouest*. 42p.
- Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes. (1997). *Dietary Reference Intakes for Calcium, Phosphorus, Magnesium, Vitamin D, and Fluoride*. Washington (DC), National Academies Press, US. DOI: 10.17226/5776. Accessible à <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23115811/>.
- Isaac, R. A., & Johnson W. C. (1976). Determination of total nitrogen in plant tissue, using a block digester. *Journal of Association of Official Analytical Chemists*, 59(1), 98-100. <https://doi.org/10.1093/jaoac/59.1.98>.
- Jacotot, B., & Le Parco, J.-C. (1992). *Nutrition et alimentation*. Elsevier Masson, 328p.
- Jideani, A. I. O., Silungwe, H., Takalani, T., Anyasi, T. A., Udeh, H. & Omolola, A. (2013). Antioxidant-rich natural grains products and human health. Provision chapter. Intech: 1-19. DOI : 10.5772/57169.
- Kanatti, A., Rai, K. N., Radhika, K. & Govindraj, M. (2016). Genetic architecture of open pollinated varieties of pearl millet for grain iron and zinc densities. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 76(3): 299-303. DOI: 10.5958/0975-6906.2016.00045.6.
- Koumbem, M. (2020). Effets du travail du sol et de la fertilisation organo-minérale sur les rendements du mil et la quantité de quelques éléments accumulés dans la plante dans la région centre du Burkina Faso. *Mémoire de Mater 2* en

- Géorressources/Sols et Environnement, Université Joseph KI-ZERBO. Ouagadougou, Burkina Faso. 62p.
20. Léder, I. (2004). Sorghum and Millets, in *Cultivated Plants, Primarily as Food Sources*, [Ed. GyörgyFüleky]. In "Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)". UNESCO, Oxford, U.K.
 21. MAAH. (2017). Etat des lieux de la situation alimentaire et nutritionnelle. Revue stratégique « FAIM ZERO » au Burkina Faso, Burkina Faso. 131p.
 22. Palé, S., Serme, I., Taonda, S.J-B., Ouattara,,K., Mason,,S.C., & Sohero, A. (2019). Pearl millet and cowpea yields as influenced by tillage, soil amendment and cropping system in the Sahel of Burkina Faso. *International Journal of Sciences*, 8(08), 56-64. DOI:10.18483.ijSci.2136. Online at <http://www.ijsciences.com/pub/issue/2019-08/>.
 23. Palé, S., Barro, A., Koumbem, M., Séré, A., & Traoré, H. (2021). Effets du travail du sol et de la fertilisation organo-minérale sur les rendements du mil en Zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(2): 497-510. DOI: 10.4314/ijbcs.v15i2.10.
 24. Sanou, J., Bationo, B. A., Barry, S., Nabie, L. D., Bayala, J., & Zougmore, R. (2016). Combining soil fertilization, cropping systems and improved varieties to minimize climate risks on farming productivity in northern region of Burkina Faso. *Agriculture and Food Security*, 5:20. DOI 10.1186/s40066-016-0067-3.
 25. SAS Institute. (2010). SAS/STAT®, version 9.2, Cary, North Carolina.
 26. Singh, L., Sharma, P. K., Jajoria, M., Raiger, K. L., Deewabm, P., Verma, R., & Meena, M. (2017). Nutrient content, uptake and quality of pearl millet influenced by phosphorus and zinc fertilization (*Pennisetumgalaucum* L.) under rainfed conditions. *International Journal of Chemical Science*, 1(2), 1-6. Online at <https://www.chemicaljournals.com>.
 27. Songré-Ouattara, L. T., Bationo, F., Parkouda, C., Dao, A., Bassolé, I. H. N., & Diawara, B. (2015). Qualité des grains et aptitude à la transformation : cas des variétés de Sorghum bicolor, *Pennisetumglaucum* et Zeamays en usage en Afrique de l'Ouest. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(6): 2819-2832. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i6.23>.
 28. Tielsch, J. M., & Sommer, A. (1984). The epidemiology of vitamin A deficiency and xerophthalmia. *Annual Review of Nutrition*, 4:183-205. DOI : 10.1146/annurev.nu.04.070184.001151.
 29. Karim, T., Sanoussi, A., Falalou, H., Maârouhi, I., Yacoubou, B., & Mahamane, S. (2016). Amélioration du rendement du mil par l'association avec le niébé en Zone sahélienne. *European Scientific Journal*, 12 (9), 382-394. Doi: 10.19044/esj.2016.v12n9p382.
 30. Trumbo, P., Schlicker, S., Allison, A., Yates, A. A., & Poos, M. (2001). Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. *Journal of the American Dietetic Association*, 101(3):294-301. DOI:10.17226/10026.[18].
 31. Trumbo, P., Schlicker, S., Allison, A., Yates, A. A., & Poos, M. (2002). Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein and Amino Acids. *Journal of the American Dietetic Association*, 102(11):1621-30. DOI:10.1016/S0002-8223(02)90346-9.
 32. van Duivenbooden, N. (1996). La durabilité exprimée en termes d'éléments nutritifs – avec référence spéciale à l'Afrique de l'Ouest-. Rapport no 29 du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS). Wageningen, Les Pays-Bas. 268 p.
 33. Ward, E. (2014). Addressing nutritional gaps with multivitamin and mineral supplements. *Nutrition Journal*, 13 (72), 1-10. DOI: 10.1186/1475-2891-13-72.
 34. Yadav, O. P., Singh, D. V., Vadez, V., Gupta, S. K., Rajpurohit, B. S., & Shekhawat, P. S. (2017). Improving pearl millet for drought tolerance – Retrospect and prospects. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 77(4): 464-474. DOI: 10.5958/0975 6906.2017.00062.1.
