

Réponse du maïs ensilage (*Zea mays* L.) aux époques d'apport du Zinc dans le sol sablonneux du Loukkos (Nord-Ouest du Maroc)

S. DRISSI¹, A. AÏT HOUSSA², A. BAMOUH¹, S. LAMRAK³, M. BENBELLA¹

(Reçu le 11/09/2015; Accepté le 30/11/2015)

Résumé

L'influence de l'époque d'apport au sol du Zinc (Zn) sur la croissance, le rendement et le statut nutritif en Zn du maïs ensilage a été étudiée au niveau du sol sablonneux du Loukkos. Cinq époques d'apport au sol de 5 mg/kg du Zn ont été testées au sein d'une expérimentation menée en plein champ: 1) apport bloqué à la levée, 2) apport bloqué au stade 5-6 feuilles, 3) apport bloqué au stade 8-9 feuilles, 4) apport fractionné (50% à la levée, 25% au stade 5-6 feuilles et 25% au stade 8-9 feuilles) et 5) apport de 10% de la dose totale chaque 7 jours depuis la levée jusqu'à la fin d'apparition des soies (apport continu). Le Zinc a été apporté sous forme sulfatée ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$). Un traitement sans apport du Zn a été gardé comme témoin. Les résultats ont montré que le stade adéquat d'apport du Zn est entre le stade 5-6 feuilles et le stade 8-9 feuilles. Les apports du Zn bloqué au stade 5-6 feuilles, continu et fractionné ont montré une teneur adéquate en Zn au sein de la plante (22 mg/kg). Aussi, ils ont induit les augmentations les plus élevées des paramètres de croissance et du rendement ensilage. Sous ces apports, la biomasse sèche aérienne à la récolte a augmenté de 23,5% par rapport au témoin. Cette augmentation n'a été que de 11,1% sous l'apport bloqué au stade 8-9 feuilles et à la levée.

Mots-clés: Maïs ensilage, Zinc, Époque d'apport, Sol sablonneux.

Abstract

The influence of timing of zinc (Zn) supply to the soil on growth, yield and nutritional status of corn silage in Zn was studied in the sandy soil of Loukkos. Five timings of Zn application to the soil (5 mg/kg) were tested in a field experiment: 1) at emergence, 2) at 5-6 leaf stage, 3) at 8-9 leaf stage, 4) split supply (50% at emergence, 25% at 5-6 leaf stage and 25% at 8-9 leaf stage) and 5) supply of 10% of the total dose every 7 days from emergence to the end of silking (continuous supply). Zn was supplied as a sulfated form ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) and a treatment without Zn supply was maintained as control. The results showed that the adequate timing of Zn supply is between 5-6 leaf stage and 8-9 leaf stage. Zn application at 5-6 leaf stage as well as split and continuous applications showed an adequate Zn content in the shoot at harvest (22 mg/kg). Furthermore, they induced the highest increase in growth parameters and in silage yield. Under these Zn applications, shoot dry weight at harvest increased by 23.5% compared to control. This increase was only 11.1% for Zn supplied at 8-9 leaf stage and at emergence.

INTRODUCTION

La déficience en zinc (Zn) réduit le rendement de plusieurs cultures, en l'occurrence les céréales (Cakmak, 2008). Le maïs est l'une des cultures céréalières rapportée très sensible à la carence en Zn (Lindsay and Norvel, 1977). Cet oligo-élément assure plusieurs rôles physiologiques dans la plante tels que la photosynthèse et la synthèse des protéines (Hansch and Mendel, 2009). Sa déficience est surtout repérée dans les sols calcaires, hydromorphes et sablonneux (Bhupinder *et al.*, 2005). Les symptômes de carence en Zn sur maïs apparaissent sous forme de nervures blanchâtres parallèles de part et d'autre de la nervure principale des feuilles (Alloway, 2008; Singh *et al.*, 2005). La teneur en Zn de 22 mg/Kg est rapportée comme seuil critique de la teneur adéquate en cet élément chez la plante entière du maïs à la récolte (Singh *et al.*, 2005). L'apport au sol du Zn est l'un des remèdes efficace pour

pallier la déficience en cet élément, notamment dans les sols non calcaires (Alloway, 2008). Outre la dose adéquate à apporter, la réussite d'un apport au sol nécessite la satisfaction de plusieurs facteurs en l'occurrence l'époque adéquate de son apport au cours du cycle de croissance de la culture. Cette époque dépend d'abord du comportement de cet oligo-élément dans le sol et de l'exigence de la culture en cet élément au cours de son développement. Concernant le comportement de cet oligo-élément dans le sol, plusieurs auteurs ont rapporté que la précipitation du Zn sous l'effet des oxydes de fer et de l'aluminium dans le sol est l'un des mécanismes qui limite son absorption par la plante (Kalbasi *et al.*, 1978; Ghiri *et al.*, 2011). Par ailleurs, les pertes par lessivage du Zn se considèrent faibles dans différents types de sol et sous différents régimes hydriques (Singh, 1974; Brennan and Mc Grath, 1988). Le travail mené par Rungruang *et al.* (1978) sur le maïs, cultivé en hydroponie, a montré que les apports précoces du Zn entre

¹ Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Département de Production, Protection et Biotechnologie Végétales, Rabat

² École Nationale d'Agriculture de Meknès, Département d'Agronomie et d'Amélioration des Plantes, Meknès

³ Direction Provinciale d'Agriculture de Settat, Service de mise en œuvre des projets, Settat

le stade 4 et 8 feuilles sont plus efficaces que les apports tardifs (au delà du stade 8 feuilles) en termes de croissance, de développement et de production de la biomasse. Pour d'autres cultures, Sharma *et al.* (1988) a rapporté l'efficacité des apports précoces du sulfate ou d'oxyde du Zn sur le blé par rapport aux apports tardifs au-delà de 60 jours après levée. Par ailleurs, Cakmak (2008) a montré que la concentration en Zn dans le grain du blé augmente au fur et à mesure qu'on retarde son apport. Dans ce sens, Ozturk *et al.* (2006) ont montré que les concentrations élevées en Zn dans les grains du blé sont enregistrées sous l'apport du Zn au stade laiteux. Pour la culture du riz, Johnson-Beebout *et al.* (2009) ont relevé que l'apport du Zn au semis donne un rendement optimal. Cependant, ils ont montré que l'apport au stade remplissage permet d'avoir des concentrations élevées de Zn dans le grain.

Dans le contexte des sols sableux du nord du Maroc, naturellement pauvres en Zn, la déficience en Zn se traduit par une réduction du rendement ensilage. Les études et recherches entamées dans ce sens ont montré que l'enrichissement du sol en Zn permet de corriger la déficience en cet oligo-élément (Drissi *et al.*, 2015a; Drissi *et al.*, 2015b). Néanmoins, l'époque adéquate de l'apport au sol de cet oligo-élément chez le maïs ensilage n'est pas encore bien connue, non seulement pour le cas des sables mais aussi pour les autres types de sol. La présente étude vise à évaluer l'effet de différentes époques d'apport du Zinc sur la croissance, le rendement et le statut nutritif du maïs ensilage cultivé dans le sol sablonneux du Loukkos.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Site expérimental et sol étudié

Une expérimentation en plein champ a été conduite au niveau de la ferme Bassita II, sise dans les sols sableux côtiers du périmètre irrigué du Loukkos (34,96°N lat., 6,21°O long. et 60 m d'alt., Nord-Ouest du Maroc). La zone est caractérisée par un climat côtier. Au cours du cycle de croissance de la culture (de Mai à Août), on a enregistré une température maximale de 27,3 °C, une température minimale de 18,7 °C et une pluviométrie de 11 mm. Le tableau 1 illustre une comparaison météorologique de la saison de l'expérimentation avec une série climatique de 40 ans (1970-2010) enregistrée au niveau de la zone d'étude.

Tableau 1: Comparaison entre les températures, évapotranspiration et pluviométrie enregistrées au niveau du périmètre irrigué du Loukkos durant la saison de Mai à Août de l'année 2012 et celles d'une série climatique de quarante ans (1970-2010)

	Température minimale (°C)		Température maximale (°C)		Evapotranspiration (mm jour ⁻¹)		Pluviométrie (mm)	
	2012	Moy. 1970-2010	2012	Moy. 1970-2010	2012	Moy. 1970-2010	2012	Moy. 1970-2010
Mai	15,5	13,8	26,3	22,2	3,6	2,8	7	34,7
Juin	18,2	16,7	27,7	25,0	4,1	3,6	0	9,2
Juillet	20,6	18,7	29,6	27,6	4,6	4,1	0	0,9
Août	19,9	18,9	25,7	27,6	4,0	4,1	4	1,8

Source: Direction Nationale de la Météorologie, Maroc.

Le sol étudié est sablonneux (88% des sables, 7,5% d'argile et 5,3% de limon), pauvre en Zn échangeable (0,13 mg/Kg extraction DTPA), à faible capacité d'échange cationique (3,7 meq/100g du sol), non calcaire et a un pH de 6,4. Les autres propriétés physico-chimiques du sol sont présentées au tableau 2.

Traitements étudiés et dispositif expérimental

Le maïs ensilage (cv. Panama) a été semé le 13 Mai 2012. Le semis a été effectué en lignes jumelées. L'écartement est de 0,40 m entre les deux lignes de la ligne jumelée, de 0,45 m entre les lignes jumelées, et 0,10 m sur la ligne. Le dispositif expérimental adopté est en cinq blocs aléatoires complets. La parcelle élémentaire est de 32 m². Deux parcelles adjacentes ont été séparées d'un écartement de 2 m. Cinq époques d'apport de 5 mg de Zn/Kg du sol ont été comparées: 1) apport bloqué à la levée, 2) apport bloqué au stade 5-6 feuilles, 3) apport bloqué au stade 8-9 feuilles, 4) apport fractionné (50% à la levée - 25% au stade 5-6 feuilles - 25% au stade 8-9 feuilles, 5) apport continu du Zn (de la levée à l'apparition des anthères avec un apport de 10% chaque 7 jours). Un traitement sans apport du Zn a été gardé comme témoin. La dose de 5 mg/Kg du Zn appliquée dans les différents traitements a été rapportée comme la dose optimale pour la production du maïs ensilage dans le contexte des sols sablonneux du Loukkos (Drissi *et al.*, 2015 b). Le Zn a été apporté sous forme de solution de sulfate de Zn (ZnSO₄ · 7H₂O; 21% de Zn).

Entretien de la culture

Chaque ligne jumelée de la culture est irriguée avec deux lignes de goutteurs. Le goutteur utilisé est de type intégré autorégulant de débit de 1,2 l/h, avec un écartement entre les goutteurs de 0,4 m. Un désherbage chimique en prélevée a été réalisé avec un mélange de *Pendiméthaline*, *Mésotrione*, *Terbuthylazine* et de *S-metolachlor*.

La culture a reçu durant son cycle 450 kg/ha d'azote (N), 340 Kg/ha de phosphate (P₂O₅) et 330 Kg/ha de potasse (K₂O). Aussi, 6,2 kg/ha de cuivre, 3,3 kg/ha de manganèse et 4,6 kg/ha de bore ont été apportés. La protection phytosanitaire a consisté en une pulvérisation de l'*Indoxocarbe* contre les noctuelles et de l'*Epoxiconazole* contre l'helminthosporiose.

Mesures et analyses chimiques

La hauteur de la tige, le diamètre au collet et la biomasse sèche aérienne ont été déterminés au niveau de dix plantes, choisies au hasard de chaque parcelle élémentaire, à trois stades de développement de la culture: au stade 4-5 feuilles, au stade 8-9 feuilles et à la récolte. La récolte a été effectuée à environ 54% d'humidité. A ce stade, la longueur des entre-nœuds de la plante et la surface foliaire ont été mesurées. La surface foliaire a été déterminée par la formule (1) après la mesure de la longueur et de la largeur des feuilles (Mokhtarpour *et al.*, 2010).

$$\text{Surface foliaire totale par plante} = \sum_{i=1}^{i=n} (L \times l \times 0,75) \quad (1)$$

L: longueur de la feuille, l: grande largeur de la feuille, et i: numéro d'ordre de la feuille dans la plante.

Afin de déterminer l'allocation de la biomasse sèche, trois plantes de chaque parcelle élémentaire ont été séparées en feuilles, tige et épis. Ces différentes parties ont été pesées après séchage à l'étuve à 70 °C.

Les composantes du rendement grains à savoir: le poids de mille grains, le taux de fécondation et le nombre de grains, ont été mesurées au niveau de six épis prélevés aléatoirement de chaque parcelle élémentaire.

La teneur de la plante en éléments nutritifs à la récolte a été déterminée pour les traitements suivants: aucun apport du Zn, apport fractionné, apport bloqué au stade 5-6 feuilles et apport bloqué au stade 8-9 feuilles. Pour ce faire, trois plantes de chaque traitement ont été séchées puis broyées. D'une part, trois sous échantillons de 2 g de chaque traitement ont subi une digestion chimique tri-acides (acide sulfurique, acide perchlorique et acide nitrique). Le filtrat du matras est ensuite analysé pour déterminer sa teneur en Zn à l'aide d'un appareil d'absorption atomique (Varian AA 240 FS). D'autre part, trois sous échantillons de 0,6 g de chaque traitement ont subi une digestion chimique di-acides (acide acétique et acide sulfurique) pour déterminer la teneur en N, P, K et Mg. La teneur du matras en N et en P a été déterminée par un auto-analyseur (Skalar SAN⁺⁺), alors que la teneur en K et en Mg a été déterminée par absorption atomique.

La teneur en Zn échangeable de la couche supérieure du sol (0-20 cm) après la récolte a été déterminée pour les traitements suivants: aucun apport du Zn, apport fractionné, apport bloqué au stade 5-6 feuilles et apport bloqué au stade 8-9 feuilles. Trois échantillons du sol de chacun de ces traitements ont été prélevés, séchés à 40 °C puis tamisés. Une pesée de 20 g du sol de chaque échantillon a subi une extraction chimique en présence de l'acide di-éthylène tri-amine penta-acétique (DTPA). La teneur en Zn du filtrat a été déterminée par absorption atomique.

Analyse statistique

Les données ont subi une analyse de la variance (ANOVA) à 5% de probabilité. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, une comparaison de moyennes a été réalisée à l'aide du test de Student-Newman-Keuls à 5% de probabilité. Ces analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel SPSS (version 17.0).

Tableau 2: Caractéristiques physico-chimiques du sol (0-20 cm)

Propriété du sol	
pH (extrait aqueux 1/5)	6,10
Capacité d'échange cationique (meq/100g) (méthode de Chlorure de cobaltihexamine)	4,40
Matière organique (%) (méthode de Walkley et Black)	0,40
P ₂ O ₅ (mg/kg) (méthode d'Olsen)	49,00
K ₂ O (mg/kg) (méthode d'acétate d'ammonium)	81,00
MgO (mg/kg) (méthode d'acétate d'ammonium)	101,00
CaO (mg/Kg) (méthode d'acétate de sodium)	868,00
Zn extraction DTPA (mg/kg)	0,13
Fe extraction DTPA (mg/kg)	17,50
Mn extraction DTPA (mg/kg)	17,40
Cu extraction DTPA (mg/kg)	0,06

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Hauteur de la tige, diamètre au collet et surface foliaire

L'époque d'apport du Zn n'a agi sur la hauteur de la plante qu'au cours des premiers stades de croissance de la culture. Au stade 5-6 feuilles, cette hauteur a augmenté sous l'apport continu et fractionné du Zn par rapport aux autres époques d'apport. Au stade 8-9 feuilles, l'augmentation en hauteur est devenue plus remarquable sous l'apport bloqué à la levée, fractionné ou continu. Cependant, à la récolte, l'ensemble des époques d'apport du Zn ont montré une augmentation similaire et significative de l'ordre de 3,7% par rapport au témoin (Tableau 3). Cette réponse de la croissance en hauteur à la fertilisation en Zn a été rapportée dans d'autres études menées sur maïs (De Vasconcelos *et al.*, 2011; Drissi *et al.*, 2015a) et sur radis (Balal *et al.*, 1998). L'effet de l'apport de Zn sur la hauteur est expliqué par l'élongation des entre nœuds (Alloway, 2008). Les apports du Zn bloqué à la levée, bloqué au stade 5-6 feuilles, fractionné et continu ont stimulé la longueur des 5 entre-nœuds inférieurs de la plante. Tandis que l'apport tardif (stade 8-9 feuilles) a stimulé la longueur des 5 entre-nœuds supérieurs de la plante. Du point de vue physiologique, l'effet du Zn sur la croissance en hauteur est expliqué par le rôle de cet oligo-élément dans la synthèse des hormones de croissance comme l'acide indole acétique et l'acide gibbérellique (Cakmak *et al.*, 1988; Balal *et al.*, 1998; Sekimoto *et al.*, 1997).

Le diamètre au collet n'a montré aucune différence significative au stade 5-6 feuilles pour les différents traitements. En revanche, au stade 8-9 feuilles une augmentation significative de 12,5% par rapport au témoin a été relevée pour les apports de Zn fractionné, continu et bloqué à la levée. A la récolte, les apports du Zn bloqué à la levée, bloqué au stade 5-6 feuilles, fractionné et continu, ont permis l'augmentation la plus élevée du diamètre au collet de l'ordre de 8,4% par rapport au témoin. Cette augmentation a été rapportée dans d'autres études menées

sur le même type de sol (Drissi *et al.*, 2015a, Drissi *et al.*, 2015b). La surface foliaire à la récolte a été similaire sous les différentes époques d'apport du Zn (Tableau 3).

Biomasse sèche aérienne et teneur en éléments nutritifs

La biomasse sèche au stade jeune de la plante (5-6 feuilles) a été similaire pour les différentes époques d'apport du Zn. En revanche, au stade 8-9 feuilles, les traitements ayant reçus le Zn d'une façon continue et fractionnée ont montré une biomasse significativement plus élevée par rapport à l'apport tardif (stade 8-9 feuilles) et au témoin. A la récolte, les apports du Zn bloqué au stade 5-6 feuilles, fractionné et continu ont induit la biomasse sèche totale la plus élevée avec une augmentation significative de 23,5% par rapport au témoin (Tableau 4) et ont montré un rendement ensilage moyen de l'ordre de 45,7 T/ha. Par ailleurs, l'apport tardif (stade 8-9 feuilles), même s'il a montré une certaine capacité de récupération dans la production de biomasse, a permis uniquement une augmentation de 11,1% par rapport au témoin. Il a permis un rendement ensilage moyen de 44 T/ha. Ces résultats sont conformes à l'étude menée sur maïs, cultivé en hydroponie, ayant montré que le stade adéquat d'apport de Zn est entre le stade 4 et 8 feuilles (Rungruang *et al.*, 1978). L'apport bloqué à la levée, même s'il est précoce, n'a pas optimisé le rendement, et il a montré un rendement similaire à celui obtenu sous l'apport tardif. Cela peut être expliqué aussi bien par la non coïncidence de cet apport avec le stade adéquat de 4 à 8 feuilles que par une diminution d'efficacité du Zn apporté. Cette diminution d'efficacité a été notée au niveau des traitements: apports de Zn bloqué au stade 5-6 feuilles; stade 8-9 feuilles et fractionné. En effet, d'après les analyses du sol et du végétal effectuées pour ces traitements, on a constaté une teneur moyenne du sol en Zn échangeable après la récolte n'a été que de 0,2 mg/kg (Figure 1) après un apport initial de 5 mg/kg du Zn (équivalent de 21 kg/ha du Zn) et une absorption moyenne par la culture de 0,4 kg/ha du Zn (Figure 2a). Cette faible teneur du sol en Zn

résiduel peut être expliquée notamment par la précipitation du Zn dans le sol sous l'effet de l'oxyde de fer et de l'oxyde d'aluminium (Kalbasi *et al.*, 1978; Ghiri *et al.*, 2011). Par ailleurs, l'hypothèse du lessivage de Zn sous l'effet de l'irrigation est moins probable dans le contexte de ce type de sol (Données non publiée). Le rendement ensilage de 38,5 T/ha enregistré chez le témoin peut être expliqué par la faible teneur du sol en Zn échangeable (0,13 mg/Kg) qui est en-dessous du seuil critique pour la production du maïs (0,8 mg/Kg) (Lindsay and Norvell, 1977). La réponse de la production de la biomasse sous l'apport du Zn peut être expliquée par l'activation de la photosynthèse (Cakmak and Marshner, 1993) à travers la synthèse de l'enzyme l'anhydrase carbonique (Sasaki *et al.*, 1998).

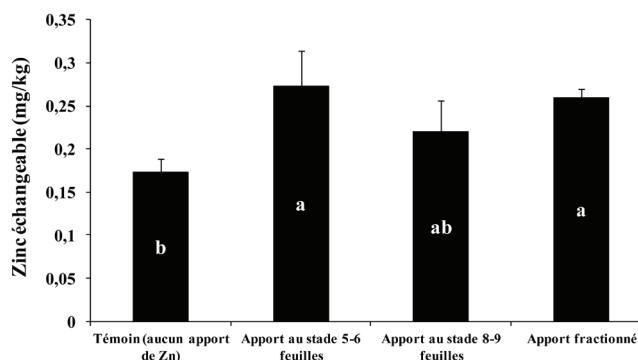


Figure 1: Teneur en Zn échangeable du sol (Extraction DTPA) après récolte selon différentes époques de son apport. Les moyennes des traitements suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (Test de Student-Newman-Keuls à 5% de probabilité).

L'analyse du statut nutritif de la plante à la récolte effectuée pour les traitements: apports de Zn bloqué au stade 5-6 feuilles; stade 8-9 feuilles et fractionné n'a pas montré un effet significatif de l'époque d'apport du Zn sur la teneur de la plante en cet élément. Elle a atteint un niveau adéquat de l'ordre de 22 mg/kg (Singh *et al.*, 2005). Cependant,

Tableau 3: Effet de l'époque d'apport du Zn sur la hauteur de la tige, le diamètre au collet et la surface foliaire du maïs ensilage

	Hauteur de la tige (cm)			Diamètre au collet (cm)			Surface foliaire à la récolte (m ² /plante)
	Stade	Stade	Récolte	Stade	Stade	Récolte	
	5-6 feuilles	8-9 feuilles		5-6 feuilles	8-9 feuilles		
Témoin (Aucun apport de Zn)	18,1 ±	35,2 ±	236,7 ±	1,47 ±	1,59 ±	1,66 ±	0,38 ±
	2,82 bc	9,37 b	19,18 b	0,33 ab	0,21 b	0,22 b	0,05 a
Apport bloqué à la levée	18,2 ±	38,3 ±	241,3 ±	1,45 ±	1,81 ±	1,80 ±	0,38 ±
	2,19 bc	6,12 ab	9,20 ab	0,21 ab	0,20 a	0,23 a	0,06 a
Apport bloqué au stade 5-6 feuilles	18,2 ±	35,7 ±	245,9 ±	1,39 ±	1,60 ±	1,80 ±	0,43 ±
	3,49 bc	8,37 b	12,69 a	0,22 b	0,15 b	0,21 a	0,05 a
Apport bloqué au stade 8-9 feuilles	17,5 ±	31,8 ±	246,5 ±	1,43 ±	1,63 ±	1,73 ±	0,38 ±
	2,72 c	7,04 c	12,69 a	0,21 b	0,22 b	0,24 ab	0,05 a
Apport fractionné	20,3 ±	41,2 ±	246,1 ±	1,55 ±	1,80 ±	1,85 ±	0,42 ±
	3,01 a	10,19 a	16,12 a	0,22 a	0,19 a	0,23 a	0,06 a
Apport continu	19,0 ±	38,7 ±	248,1 ±	1,46 ±	1,76 ±	1,82 ±	0,43 ±
	2,93 ab	7,81 ab	10,95 a	0,22 ab	0,19 a	0,18 a	0,07 a

Valeurs du tableau sont présentées sous forme de moyenne ± écart type. Pour chaque colonne, les moyennes des traitements suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (Test de Student-Newman-Keuls à 5% de probabilité).

le témoin a montré une teneur déficitaire de l'ordre de 17 mg/kg. De même, la teneur de la plante en autres éléments nutritifs n'a montré aucune réponse significative vis-à-vis de l'époque d'apport du Zn (Données non affichées). Les teneurs en N (1%), en P (0,25%), en K (0,65 %) et en Mg (0,16%) ont été dans les normes recommandées pour le maïs à la maturité (Fageria *et al.*, 2011; Arnon, 1975; Fox and Piekielek, 1984).

L'analyse de l'allocation de la biomasse sèche au niveau de la partie aérienne de la plante à la récolte a montré que l'époque d'apport du Zn a agi sur la biomasse de l'épi, de la

tige et des feuilles. Cet effet paraît surtout lié à la biomasse sèche de l'épi qui contribue en moyenne à autour de 70% de la biomasse sèche aérienne totale (Tableau 5). L'apport du Zn bloqué au stade 5-6 feuilles, fractionné ou continu ont montré une augmentation significative de 15,3% de la biomasse sèche de l'épi par rapport au témoin. L'apport du Zn bloqué au stade 8-9 feuilles et bloqué à la levée n'a pas amélioré significativement la biomasse sèche de l'épi.

La réponse de l'épi à l'époque d'apport du Zn a été surtout liée à celle des grains qui contribuent en moyenne à 77% de la biomasse sèche totale de l'épi. Deux composantes du

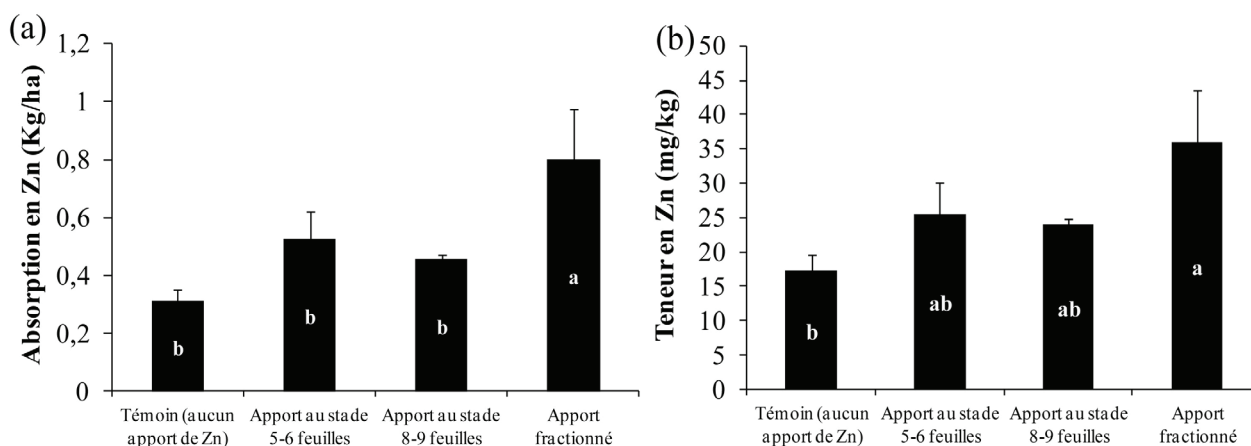


Figure 2: Absorption (a) et teneur (b) en Zn du maïs ensilage à la récolte sous différentes époques de son apport. Les moyennes des traitements suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (Test de Student-Newman-Keuls à 5% de probabilité).

Tableau 4: Effet de l'époque d'apport du Zn sur la biomasse sèche aérienne du maïs ensilage

	Biomasse sèche aérienne (g/plante)		
	Stade 5-6 feuilles	Stade 8-9 feuilles	Récolte
Témoin (aucun apport de Zn)	6,22 ± 2,84 ab	8,86 ± 3,22 b	217,5 ± 50,4 c
Apport bloqué à la levée	3,77 ± 1,24 c	11,29 ± 2,57 ab	240,9 ± 46,0 b
Apport bloqué au stade 5-6 feuilles	4,84 ± 1,79 ab	11,13 ± 5,26 ab	257,7 ± 53,7 ab
Apport bloqué au stade 8-9 feuilles	4,36 ± 1,39 bc	8,38 ± 2,64 b	238,2 ± 44,1 b
Apport fractionné	6,58 ± 2,21 a	14,37 ± 5,54 a	279,1 ± 59,8 a
Apport continu	5,83 ± 1,68 ab	12,37 ± 3,28 a	269,3 ± 49,7 a

Valeurs du tableau sont présentées sous forme de moyenne ± écart type. Pour chaque stade de développement, les moyennes des traitements suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (Test de Student-Newman-Keuls à 5% de probabilité).

Tableau 5: Effet de l'époque d'apport de Zn sur l'allocation de la biomasse sèche aérienne chez le maïs ensilage à la récolte

	Biomasse sèche (g/plante)		
	Tige	Feuilles	Epi
Témoin (aucun apport de Zn)	48,00 ± 13,73 b	17,69 ± 3,86 b	161,1 ± 32,9 c
Apport bloqué à la levée	58,03 ± 15,53 ab	19,81 ± 4,44 ab	186,2 ± 33,0 bc
Apport bloqué au stade 5-6 feuilles	56,58 ± 12,84 ab	19,61 ± 4,26 ab	179,5 ± 25,2 ab
Apport bloqué au stade 8-9 feuilles	62,03 ± 13,64 ab	20,26 ± 3,26 ab	172,0 ± 25,9 bc
Apport fractionné	68,65 ± 17,47 a	21,40 ± 5,80 ab	191,9 ± 22,2 a
Apport continu	65,74 ± 16,26 a	24,48 ± 7,26 a	186,0 ± 28,2 ab

Valeurs du tableau sont présentées sous forme de moyenne ± écart type. Pour chaque organe, les moyennes des traitements suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (Test de Student-Newman-Keuls à 5% de probabilité).

rendement grains ont été influencées par l'époque d'apport du Zn: le taux de fécondation et le nombre de grains par épi. Les apports du Zn fractionné, continu et bloqué au stade 5-6 feuilles ont montré un taux de fécondation élevé de l'ordre de 90%. Cependant, l'apport tardif du Zn (stade 8-9 feuilles) a montré un taux de fécondation faible et similaire à celui du témoin de l'ordre de 85%. L'augmentation du taux de fécondation par l'apport du Zn a été rapportée dans d'autres études menées dans ce même type de sol (Drissi et al., 2015a; Drissi et al., 2015b). Cela peut être expliqué par le rôle physiologique que joue le Zn dans l'augmentation de la viabilité de la fertilité mâle (Sharma et al., 1990). Par ailleurs, le poids de mille grains n'a montré aucune réponse significative vis-à-vis de l'époque d'apport du Zn et l'ensemble des époques testées ont montré une augmentation de 9,5% par rapport au témoin (Tableau 6). L'augmentation du poids de mille grains est notamment due au rôle que joue le Zn dans l'activation de la photosynthèse (Cakmak and Marshner, 1993).

CONCLUSION

La maîtrise de l'époque d'apport du Zn chez le maïs ensilage cultivé dans le sol sablonneux est un paramètre déterminant pour la réussite de la fertilisation en cet oligo-élément. En effet, on a constaté que le stade adéquat d'apport du Zn au sol se situe entre le stade 5-6 feuilles et le stade 8-9 feuilles. L'optimum du rendement ensilage a été enregistré sous les apports de Zn bloqué au stade 5-6 feuilles, continu et fractionné (50% à la levée, 25% au stade 5-6 feuilles et 25% au stade 8-9 feuilles). L'apport du Zn tardif au-delà du stade 8-9 feuilles et à la levée n'a permis qu'une légère augmentation de la biomasse.

REMERCIEMENTS

Au titre de ce travail, les auteurs tiennent à remercier M. Loultiti M. M. et M. Coquant J. M. pour leur aide financier. Nous remercions aussi Mme Mouhtadi R., M. Ziti S., M. Soulaïmani A., M. Daoudi E., M. Touhami D. et à tout le staff technique du Laboratoire Marocain d'Agriculture (LABOMAG). Nos remerciements vont également à M. Belbasri et à M. Ouïnas A., responsables au sein des fermes Mazaria et Bassita II, pour leur collaboration à l'installation et au suivi de l'expérimentation en plein champ.

RÉFÉRENCES

- Alloway J.B. (2008). Zinc in soils and crop nutrition (2nd ed.). International Zinc Association Communications. IZA Publications, Brussel. http://www.zinc.org/general/Zinc_in_Soils_and_Crop_Nutrition_ALLOWAY.pdf
- Arnon I. (1975). Mineral nutrition of maize. International Potash Institute, Bern. http://www.ipipotash.org/udocs/mineral_nutrition_of_maize.pdf
- Balal H., Norihiro H., Yoshitaka N., Masahito S. and Hiroshi T. (1998). Zinc nutrition and levels of endogenous Indole-3-acetic acid in radish shoots. *J. Plant Nutr.* 21: 1113–1128.
- Bhupinder S., Senthil K.A.N., Singh B.K. and Usha K. (2005). Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency. *Curr. Sci.* 88: 36–44.
- Brennan R.F. and Mc Grath J.F. (1988). The vertical movement of Zinc on sandy soils in southern Western Australia. *Austr. J. Soil Res.* 26: 211–216.
- Cakmak I., Marshner H. and Bangerth F. (1988). Effect of zinc nutritional status on growth, protein metabolism and levels of indole 3 acetique acid and other phytohormones in bean (*Phaseolus vulgaris*). *J. Exp. Bot.* 40: 405–412.
- Cakmak I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant Soil*, 302: 1-17.
- Cakmak I. and Marshner H. (1993). Effect of zinc nutritional status on activities of superoxide radical and hydrogen peroxide scavenging enzymes in bean leaves. *Plant Soil*, 155 (156): 127–130.
- De Vasconcelos A. C. F., Clístenes W. A. N. and Fernando F.C. F., (2011). Distribution of zinc in maize plants as a function of soil and foliar Zn supply. *Inter. Res. J. Agr. Sci.* 1: 1-5.
- Drissi S., Aït Houssa A., Bamouh A. et Benbella M. (2015) a. Response of corn silage (*Zea mays* L.) to zinc fertilization on a sandy soil under field and outdoor container conditions. *J. Saudi Soc. Agr. Sci.* doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.002>
- Drissi S., Aït Houssa A., Bamouh A., et Benbella, M. (2015) b. Corn silage (*Zea mays* L.) response to zinc foliar spray concentration when grown on sandy soil. *J. Agr. Sci.* 7: 68-79.

Tableau 6: Effet de l'époque d'apport de Zn sur les composantes de rendement grains du maïs ensilage

	Nombre de grains par épi	Taux de fécondation (%)	Poids de mille grains (g)
Témoin (aucun apport de Zn)	582,7 ± 107,1 b	85,6 ± 6,11 b	215,5 ± 40,9 b
Apport bloqué à la levée	582,1 ± 96,1 b	87,3 ± 6,34 ab	227,3 ± 36,0 ab
Apport bloqué au stade 5-6 feuilles	606,3 ± 84,07 ab	89,3 ± 5,07 a	226,9 ± 31,8 ab
Apport bloqué au stade 8-9 feuilles	550,1 ± 108,0 b	85,4 ± 4,75 b	247,4 ± 43,5 a
Apport fractionné	647,3 ± 70,5 a	90,5 ± 4,08 a	234,7 ± 40,5 ab
Apport continu	602,8 ± 82,6 a	90,3 ± 5,04 a	244,1 ± 43,3 a

Valeurs du tableau sont présentées sous forme de moyenne ± écart type. Pour chaque composante de rendement grains, les moyennes des traitements suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (Test de Student-Newman-Keuls à 5% de probabilité).

- Fox R. H., and Piekielek W.P. (1984). Soil magnesium level, corn (*Zea mays* L.) yield, and magnesium uptake. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 15: 109-123.
- Johnson-Beebout S.E., Lauren J.G. and Duxbury J.M. (2009). Immobilisation of zinc fertilizer in flooded soils monitored by DTPA soil test. *Comm. Soil Sci. and Plant Analysis* 40:1842-1861
- Hansch R. and Mendel R.R. (2009). Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Curr. Opin. Plant Biol.* 12: 259–266.
- Ghiri M. N., Rezaei M. and Sameni A. (2011). Zinc sorption–desorption by sand, silt and clay fractions in calcareous soils of Iran. *Arch. Agro. Soil Sci.* 58: 945-957.
- Kalbasi M., Racz, G.J. and Loewen-rudgers L.A. (1978). Mechanism of zinc adsorption by iron and aluminum oxides. *Soil Sci.* 125: 146-150.
- Lindsay W.L. and Norvell W.A. (1977). Development of a DTPA soil test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421–428.
- Mokhtarpour H., The C. B. S., Saleh G., Selamat A. B., Asadi M. E. and Kamkar B. (2010). Non destructive estimation of maize leaf area, fresh weight, and dry weight using leaf length and leaf width. *Comm. Biometry Crop Sci.* 5: 19-26.
- Ozturk L., Yazici M.A., Yucel C., Cekic Bagci A., Ozkan H. and Cakmak I. (2006). Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat, *Physiol plant* 128:144-152.
- Rungruang I., Doyle P. and Raymond L. (1978). Utilization and redistribution of Zn during vegetative growth of corn. *Agron. J.* 70: 243–246.
- Sasaki H., Hirose T., Watanabe Y. and Ohsugi R. (1998). Carbonic anhydrase activity and CO₂ Transfer resistance in Zn deficient rice leaves. *Plant Physiol.* 118: 929–934.
- Sekimoto H., Hoshi M., Yokota T. and Nomura T. (1997). Zinc efficiency of dwarf *Zea mays* treated with a gibberellin-biosynthesis inhibitor. *Plant Nutr. Sustain. Food Product. Environ.* 78: 263–264.
- Sharma, P.N., Chatterjee, A.S.C. and Saharma, C.P. (1990). Zinc deficiency and pollen fertility in maize (*Zea mays*). *Plant Soil* 124: 221–225.
- Sharma B.D., Singh Y. and Singh B. (1988). Effect of time of application on the effectiveness of zinc sulphate and zinc oxide as sources of zinc for wheat. *Fertilizer Research* 17:147-151.
- Singh B.R. (1974). Migration of ions in soils I. Movement of Zn⁶⁵ from surface application of zinc sulphate in soil columns. *Plant Soil* 41: 619-628.
- Singh B., Natesan S. K. A., Singh B. K. and Usha K. (2005). Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency. *Curr. Sci.* 88: 36-44.