

Inhibition de la croissance et du rendement du maïs (*Zea mays* L.) en sols très acides au Cameroun, et identification de critères précoces de tolérance à la toxicité

Delphine Mapiemfu-Lamaré¹, C. Thé², E. Tsoata³, C. Zonkeng¹ & Yvette Clarisse Mfopou Mewouo¹

Keywords: Acidity- Early selection- Aluminium toxicity- *Zea mays*- Cameroon

Résumé

Dix-sept génotypes de maïs ont été évalués en champ, sur sol acide à toxicité aluminique et sur sol à acidité corrigée afin d'identifier des génotypes tolérants, pouvant servir de parent ou de donneur de gènes dans un programme d'amélioration. Quatre génotypes retenus pour leur comportement contrasté ont été testés en pots, utilisant un sol toxique en aluminium et un sol à acidité corrigée, dans le but de déterminer des critères de sélection précoce et fiable, utilisables lors du criblage des génotypes de maïs pour leur tolérance à la toxicité aluminique sur sols acides. Les résultats obtenus ont montré qu'en champ, cinq lignées endogames ont présenté des rendements au moins égaux à 1,60 t/ha; et trois d'entre elles ont montré des pertes de rendement de moins de 10% dues à l'acidité des sols. Les paramètres hauteur de l'insertion de l'épi, hauteur de la plante et rendement en grains, ont permis d'identifier des génotypes de maïs tolérants à la toxicité aluminique. La hauteur de la plante et la longueur de la racine séminale, évaluées à 21 jours après le semis en pots, peuvent être efficaces comme critères de sélection précoce lors du criblage des génotypes de maïs pour la tolérance à la toxicité aluminique.

Summary

Grain Yield and Growth Inhibition of Maize (*Zea Mays* L.) on Strongly Acid Soils of Cameroon and Identification of Early Selection Criteria for Aluminium Tolerant Genotypes

Seventeen maize genotypes were evaluated in the field experiment, on aluminium toxic soil as well on amended acidic soil to identify aluminium tolerant genotypes that could be used as parent or as gene donor in breeding program. Four contrasting genotypes were used in pots experiment to identify early selection criteria which could be used to speed up the breeding process. The results obtained revealed that, in the field, five inbred lines yielded on acid soil at least 1.63 t/ha, and three of them exhibited relative grain yield lost due to sol acidity of less than 10%. Ear height, plant height and grain yield, were efficient in determining maize genotypes tolerant to acidic soil. In addition, plant height and seminal root elongation evaluated at 21 days after planting in pots can be efficiently used as early selection criteria to discriminate inbred lines for their tolerance to aluminium toxicity.

Introduction

Le maïs est l'une des graminées les plus cultivées dans le monde (3). Il constitue l'aliment le plus important en Amérique du Sud, aux Caraïbes et en Afrique (7). Le maïs est planté sur 140 millions d'hectares de la surface arable du globe, donc 8 millions d'ha sont des sols acides (5, 17). En Afrique sous les tropiques, le maïs est cultivé sur 94 millions d'hectares, et les sols acides occupent 29% des terres arables (8). Sur ces terres, les rendements de maïs sont réduits dû à la toxicité en Al ou Mn, ou encore aux déficiences en Ca, Mg, P, et Mo (2, 4, 6). Ces sols ont généralement un pH bas. Les caractéristiques ci-dessus citées, inhibent le développement racinaire, conduisant à une absorption faible de l'eau, des nutriments et par conséquent à des faibles rendements. L'amélioration de la sécurité alimentaire, qui implique

entre autre l'augmentation de la production du maïs se heurte à des contraintes de production telles que: la baisse de la fertilité des sols, la faible adaptabilité des génotypes aux climats, l'irrégularité des pluies, les maladies (1), l'acidité des sols et particulièrement la toxicité aluminique (10). Chez le maïs, cette acidité des sols peut entraîner des baisses de rendements de l'ordre de 67% (20). Selon Welcker *et al.* (22), l'effet négatif de la toxicité aluminique des sols sur le rendement en grain se situe entre 46 et 73% selon les localités.

Pour lutter contre les sols acides, le chaulage, les amendements calcaires et magnésiens, les engrais minéraux sont souvent appliqués, avec de bons résultats (7, 10, 16). Les biofertilisants mycorrhiziens qui permettent entre autres une amélioration de la

¹Institut de Recherche Agricole pour le Développement.

²West Africa Centre for Crop Improvement University of Ghana, Legon P.O. Box PMB 30, Legon Accra, Ghana.

³Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, B.P. 812 Yaoundé, Cameroun.

Correspondances à Mapiemfu-Lamaré Delphine. E-mail/tel: mapiemfu@yahoo.fr (237) 99741910.

Adresse postale complète: Institut de Recherche Agronomique pour le Développement (IRAD), B.P. 80, Bamenda, Cameroun. Tel. (237) 99 74 19 10.

Reçu le 08.04.10 et accepté pour publication le 22.02.11.

tolérance aux maladies, une meilleure adaptation aux mauvaises conditions de l'environnement et une amélioration des rendements de cultures (15), sont parfois utilisés. La rareté et le coût élevé de ces fertilisants et biofertilisants constituent les limites des solutions ci-dessus citées.

La sélection et l'utilisation des variétés de maïs tolérantes constituent une alternative en vue de l'augmentation des rendements sur les sols acides, évitant ainsi les énormes pertes enregistrées avec les variétés sensibles (9). Ainsi Thé *et al.* ont obtenu des augmentations de rendement de 13% en comparant sur sol à toxicité aluminique, les performances de l'ATP-SR-Y, cultivar sélectionné pour sa résistance à la toxicité aluminique, au témoin local CMS 8501. Cette augmentation de rendement a été estimée par le même auteur à 61% en comparaison au témoin sensible à la toxicité aluminique *Tuxpeño sequia*.

Le développement et le criblage des génotypes de maïs tolérants à l'acidité aluminique, que ce soit au laboratoire ou au champ est généralement onéreux et nécessite beaucoup de temps et de matériels. La détermination de paramètres précoces en pots en relation avec les paramètres tardifs déterminés en champ s'avère nécessaire afin de réduire le coût et temps du travail. Cette étude identifie les critères précoces de tolérance des génotypes de maïs à la toxicité aluminique telle qu'elle se manifeste sur les rendements en champ sur sols très acides au Cameroun.

Matériel et méthodes

Sites d'étude

Deux essais ont été réalisés pour cette étude. Un essai en champ a été conduit dans la station de recherche de l'IRAD Nkoemvone à Ebolowa (2° 90' N; 11° 20' E), à une altitude 560 m; la pluviométrie annuelle moyenne est de 1800 mm avec une distribution bimodale. Le sol est du type kandiudox (classification USDA, 1992). L'autre essai a été effectué en pots au Centre Régional de l'IRAD Nkolbisson (11° 36' E; 3° 44' N) sous une ombrière à la température ambiante de 25 °C ± 3 °C, éclairée par la lumière du jour.

Expérience en champ

Description des sols utilisés

Le sol du site d'expérimentation a été analysé lors d'une étude antérieure publiée en 2006 (20). Les données figurent au tableau 1. Ce sol était acide, avec un pH_{eau} proche de 4, ce qui laissait supposer un risque majeur de toxicité aluminique pour les plantes. L'analyse montrait en effet que le pourcentage d'aluminium par rapport à la somme des cations extraits à la cobaltihexamine était proche de 50%. La CEC était très faible, ce qui est caractéristique d'un sol très altéré où le minéral argileux largement dominant est la kaolinite.

Tableau 1
Caractéristiques chimiques du sol du site expérimental d'Ebolowa

Caractéristiques ⁽¹⁾	Profondeurs	
	0-10 cm	10-20 cm
Ca, cmolc/kg	0,80	0,56
Mg, cmolc/kg	0,50	0,31
K, cmolc/kg	0,14	0,11
Na, cmolc/kg	0,05	0,05
Mn, cmolc/kg	0,04	0,05
Al, cmolc/kg	1,44	1,06
H, cmolc/kg	0,16	0,16
CEC, cmolc/kg	3,54	3,32
pH _{eau} ⁽²⁾	4,09	4,10
TSA _(%) ⁽³⁾	46	46

⁽¹⁾Éléments échangeables extraits par la méthode cobaltihexamine;

⁽²⁾Rapport pondéral sol:eau 1:2,5; ⁽³⁾Taux de saturation en Al par rapport à la somme des cations échangeables. Source: (20)

Le site a été divisé en deux blocs. Le 1^{er} bloc a été implanté sur le sol très acide non amendé propice à la toxicité aluminique, et le 2^e bloc a été implanté sur ce même sol après correction de l'acidité un mois avant la mise en place de l'essai par apport de chaux à raison 2500 kg/ha et de fientes de poules à raison de 2 t/ha. La chaux et les fientes de poules donnent lieu à une remontée du pH et à un apport d'éléments nutritifs tels que Ca, K et Mg.

Matériel végétal

Le matériel végétal était constitué de 17 génotypes de maïs. Le niveau de tolérance à l'acidité aluminique de certains de ces génotypes de maïs était connu (20), et est mentionné dans le tableau 2.

Dispositif expérimental et semis

Le dispositif expérimental était un split-block. La variable primaire était le type de sol: Traitement E pour le sol acide toxique en aluminium et traitement T pour le sol à acidité corrigée. La variable secondaire était les génotypes, arrangés en blocs complètement randomisés en deux répétitions. L'unité expérimentale était une ligne de 5 m de long. La densité totale de semis était 53 333 plantes/ha.

Collecte des données

La collecte des données s'est faite 4 mois après le semis, à la récolte. Pour chaque variété, les données ont été prises sur 6 plantes consécutives sur chaque ligne. Les paramètres suivants ont été mesurés: la hauteur moyenne de la plante, la hauteur d'insertion de l'épi, le nombre de plantes récoltées par parcelle élémentaire, le nombre d'épis récoltés par parcelle élémentaire, le poids des épis à la récolte par parcelle élémentaire, et l'humidité relative des grains de maïs.

Tableau 2

Rendement et caractéristiques morphologiques (HP= hauteur de la plante; HE= hauteur de l'insertion de l'épi) de 17 lignées endogames de maïs en champ sur sol acide avec toxicité aluminique (E) et sur le même sol dont l'acidité a été corrigée (T) et leur niveau présumé de tolérance à l'aluminium (R: résistant; S: sensible; M: tolérance moyenne).

Lignées	Tolérance Al	Rendement (t/ha)			HP (cm)		HE (cm)	
		E	T	% réduction	E	T	E	T
<i>CML 254</i>	/	1,89 ± 1,00	2,91 ± 1,03	35,1	85 ± 7	150 ± 14	35 ± 7	76 ± 8
<i>87036</i>	/	1,65 ± 0,16	1,85 ± 0,00	9,8	105 ± 7	195 ± 7	40 ± 0	120 ± 14
<i>91105</i>	/	1,80 ± 0,03	1,95 ± 0,50	7,7	90 ± 6	180 ± 14	40 ± 0	95 ± 7
<i>CML 358</i>	/	1,78 ± 0,15	1,81 ± 0,51	1,7	90 ± 13	145 ± 7	35 ± 7	76 ± 8
<i>ATP S₄ 25W</i>	R	1,64 ± 0,16	3,18 ± 0,63	48,4	130 ± 0	145 ± 7	50 ± 0	75 ± 8
<i>CLA 18</i>	/	1,63 ± 0,10	2,92 ± 0,37	44,2	105 ± 7	185 ± 7	40 ± 0	95 ± 21
<i>Cam Inb gp₁₇</i>	R	1,45 ± 0,16	2,08 ± 1,33	30,3	105 ± 7	160 ± 14	50 ± 0	91 ± 13
<i>M131</i>	M	1,39 ± 0,33	2,02 ± 1,43	31,2	90 ± 13	145 ± 7	36 ± 8	76 ± 8
<i>Entrada 3</i>	R	1,22 ± 0,15	3,41 ± 0,81	64,2	100 ± 0	155 ± 21	40 ± 0	85 ± 21
<i>CML 247</i>	/	1,15 ± 0,00	2,15 ± 1,08	46,5	80 ± 0	155 ± 7	35 ± 7	81 ± 1
<i>CML 365</i>	R	0,97 ± 0,21	1,70 ± 0,20	42,9	85 ± 21	150 ± 0	35 ± 7	81 ± 1
<i>CLA 17</i>	/	0,96 ± 0,13	1,97 ± 0,33	51,3	100 ± 28	185 ± 7	40 ± 14	105 ± 7
<i>88094</i>	R	0,96 ± 0,03	1,59 ± 0,00	39,7	100 ± 0	165 ± 21	40 ± 0	95 ± 21
<i>9450</i>	/	0,94 ± 0,37	2,21 ± 0,12	57,5	115 ± 7	160 ± 28	45 ± 7	95 ± 35
<i>Exp₁ 24</i>	S	0,88 ± 0,02	2,46 ± 1,33	64,2	90 ± 13	155 ± 7	35 ± 7	75 ± 7
<i>Tuxpeño sequia</i>	/	0,87 ± 0,26	2,93 ± 0,66	70,3	96 ± 6	180 ± 56	40 ± 1	100 ± 14
<i>CML 361</i>	/	0,83 ± 0,17	1,50 ± 0,12	44,7	95 ± 21	160 ± 28	40 ± 14	75 ± 7
Moyenne		1,29	2,27	40,6	97,71	162,94	39,76	88,00
ppds (0,05)		0,59	0,59		26,92	26,92	17,36	17,36
CV (%)		49,3	31,8		12,7	10,2	19,7	14,0

Expérience en pots

Sols utilisés

Deux types de sols ont été utilisés pour cet essai en pots. Le premier a été prélevé dans le site d'expérimentation en champ ci-dessus. Le second type était un terreau fourni par un pépiniériste, fertilisé avec 0,5 kg de fiente de poules sèche par pot de 5 litres rempli de sol sec. Des échantillons de ces deux substrats ont été analysés à l'Institut de Recherches Agricoles pour le Développement, à Yaoundé. Ils ont été séchés, puis broyés à 2 mm. Le pH_{eau} a été mesuré au rapport sol/eau 1/2,5. Le phosphore assimilable a été dosé selon la méthode de Bray 2 (extraction par une combinaison de HCl et de NaF et dosage du P par colorimétrie au molybdate d'ammonium). Les ions Al³⁺ ont été extraits par une solution de KCl 1M et dosés par titrimétrie. Les cations échangeables ont été extraits par une solution d'acétate d'ammonium 1M à pH 7

et dosés par spectroscopie d'absorption atomique. La CEC a ensuite été mesurée par désorption de l'ammonium au KCl après lavage de l'excès de NH₄₊ à l'alcool. Ces méthodes sont décrites en détail dans le livre de Van Ranst *et al.* (21).

Matériel végétal

Le matériel végétal était constitué de 4 géotypes de maïs dont 2 tolérants *ATP S₄ 25W* et *Cam Inb gp₁₇*, 1 sensible *Exp₁ 24* à la toxicité aluminique (20) et le 4^e *Tuxpeño sequia*, présumé sensible à la toxicité aluminique.

Dispositif expérimental et semis

Le dispositif expérimental était un split-block. La variable primaire était le type de sol: traitement E pour le sol acide toxique en aluminium et traitement T pour le substrat non toxique en aluminium. La variable

Tableau 3
Résultats de l'analyse chimique des échantillons de sols utilisés en pots

Type de substrat	pH _{eau}	Al cmolc/kg	Ca cmolc/kg	Mg cmolc/kg	K cmolc/kg	Na cmolc/kg	CECE ⁽¹⁾ cmolc/kg	TSA (%)	P mg/kg
Terre toxique en Al (E)	3,40	1,99	0,77	0,33	0,37	0,06	3,52	56,8	56
Terre non toxique en Al (T)	5,30	0,00	11,19	4,87	1,19	0,13	17,39	0,0	1264

⁽¹⁾ CECE (CEC effective)= somme des cations échangeables. TSA: taux de saturation en Al= Al/CECE en %.

secondaire était les géotypes cultivés en pots de 5 litres arrangés en blocs complètement randomisés en 3 répétitions. Sur chaque pot, quatre grains de maïs ont été semés, chacun dans un poquet. L'arrosage s'est fait tous les deux jours à l'eau de robinet.

Collecte des données

Des mesures morphométriques ont été effectuées 21 et 35 jours après le semis. Les jeunes plantes ont été déterrées délicatement et les racines ont été plongées dans une grande cuvette d'eau de robinet pour les débarrasser des particules terre. Les caractères morphométriques suivants ont été relevés : la hauteur de la plante, le nombre de feuilles, le diamètre de la tige, le nombre de ramifications racinaires, le poids frais et le poids sec du système racinaire, la longueur de la racine séminale (LRS).

Analyse statistique

L'analyse de la variance des données prises pour tous les paramètres et pour les deux expériences a été faite en utilisant la procédure "General Linear Model" (GLM) du logiciel SAS, 2001. Les moyennes ont été séparées en utilisant le test de Duncan à $p < 0,05$. La classification des variétés pour leur tolérance aux sols acides s'est faite en comparant le pourcentage relatif de changement dû à l'acidité des sols des paramètres mesurés.

Résultats et discussion

Essai en champ

Les résultats de l'essai en champ sont présentés au tableau 2. Le rendement en grains des lignées de maïs sur sol acide a varié entre $0,83 \pm 0,17$ t/ha (CML 361) et $1,89 \pm 1,00$ t/ha (CML 254). La lignée CML 254 est apparue comme la meilleure sur sol acide. Elle a été suivie par la 91105: $1,80 \pm 0,03$ t/ha; la CML 358: $1,78 \pm 0,15$ t/ha; la 87036: $1,65 \pm 0,16$ t/ha ATP S₄ 25W: $1,64 \pm 0,16$ t/ha et CLA 18: $1,63 \pm 0,10$ t/ha. La perte relative en rendement a varié de 1,7 (CML 358) à 70,3% (Tuxpeño sequia). Trois géotypes ont présenté une perte de rendement inférieure à 10%; il s'agit de la CML358 1,7%, la 91105: 7,7% et la 87036: 9,8% qui ont ainsi été les meilleurs géotypes sur sol acide. Neuf autres géotypes ont montré des pertes

relatives de rendement dues à la toxicité aluminique de moins de 50%. On peut citer parmi ces géotypes ATP S₄25W (48,4%), Cam Inb gp₁17 (30,3%).

Les neuf géotypes pouvant être considérés comme tolérants aux sols acides sont: Cam Inb gp₁17 (30,3%), M131 (31,2%) CML 254 (35,1%), 88094 (39,7%), CLA 18 (44,2%), CML 361 (44,7%), CML 365 (42,9%), CML 247 (46,5%), ATP S₄25W (48,4%). Parmi les géotypes qui ont présenté des pourcentages de réduction de rendement très élevés due à l'acidité des sols, se trouvent Tuxpeño sequia (70,3%) et Exp₁24 (64,2%).

On a noté que sur sol toxique en aluminium, la hauteur de la plante, la hauteur de l'insertion de l'épi et le rendement en grains étaient réduits chez les différents géotypes, mais que les géotypes tolérants présentaient les moindres réductions par rapport aux géotypes sensibles. Ces résultats sont similaires à ceux de Mekoak (13) et de Thé *et al.* (20). Les paramètres hauteur de l'insertion de l'épi, hauteur de la plante et rendement en grains peuvent servir en champ comme critères de sélection lors du criblage des géotypes pour leur tolérance aux sols acides toxiques en aluminium. ATP S₄25W et Cam Inb gp₁17 ont été confirmés tolérants à l'acidité aluminique par l'essai en champ. Par contre, Exp₁24 et Tuxpeño sequia ont été confirmés sensibles à l'acidité aluminique.

Essai en pots

Les résultats de l'analyse chimique des échantillons de sols utilisés en pots (Tableau 3) montrent que le pH_{eau} du sol acide (E) était de 3,40 et que ce sol était pauvre en éléments nutritifs (Ca, Mg) et contenait 1,99 cmolc/kg d'aluminium. Par contre, le sol non toxique en aluminium (T) ne contenait pas d'aluminium extractible et présentait une forte teneur en phosphore due à l'apport de fientes de poules.

Le tableau 4 présente les performances moyennes des géotypes de maïs 21 jours après le semis pour les paramètres hauteur de la plante et longueur de la racine séminale. On note sur ce tableau qu'à 21 jours après le semis, Exp₁24 et Tuxpeño sequia qui sont respectivement connu et présumé comme géotypes sensibles à la toxicité aluminique, ont présenté des hauteurs de plante et des longueurs de la racine séminale les plus courtes sur sol toxique en aluminium

Tableau 4
Caractéristiques morphologiques moyennes des géotypes de maïs 21 jours après le semis en pots: hauteur des plantes (HP) et longueur de la racine séminale (LRS), sur sol toxique en aluminium (E) et sur sol non toxique (T)

Géotypes	HP (cm)			LRS (cm)		
	E	T	% réduction	E	T	% réduction
<i>Tuxpeño sequia</i>	6,97 ± 2,60	13,58 ± 1,72	48,7	8,45 ± 2,54	28,33 ± 2,39	70,2
<i>ATP S₄ 25 W</i>	13,41 ± 1,21	15,76 ± 1,11	14,9	28,68 ± 2,86	30,04 ± 2,54	5,7
<i>Cam Inb gp₁ 17</i>	9,76 ± 0,39	12,20 ± 0,59	20,0	18,83 ± 5,04	23,71 ± 1,22	20,6
<i>Exp₁ 24</i>	8,29 ± 0,87	10,95 ± 0,60	24,3	7,39 ± 1,95	24,23 ± 4,43	69,5
Moyenne	9,61	13,13	26,8	15,84	26,67	40,6
ppds (0,05)	1,14	1,14		4,04	4,04	

qui étaient 6,97 ± 2,60 cm; 8,29 ± 0,87 cm et 8,45 ± 2,54 cm; 7,39 ± 1,95 cm respectivement. Ces deux géotypes ont eu des pourcentages de réduction de la hauteur de la plante et de la racine séminale les plus élevées qui étaient de 24,3; 48,7 et 69,5 et 70,2% respectivement. Par contre, *ATP S₄ 25W* et *Cam Inb gp₁ 17* qui sont connus comme tolérants à l'acidité aluminique ont présenté des faibles pourcentages de réduction sur la hauteur de la plante et la longueur de la racine séminale, soient 14,9 et 20,0; 5,7 et 20,6% respectivement.

Les résultats obtenus au stade 35 jours sont présentés sur le tableau 5. Ces résultats ont rejoint ceux obtenus au stade 21 jours, surtout pour ce qui est de la longueur de la racine séminale. *Tuxpeño sequia* et *Exp₁ 24* avaient les plus courtes racines séminales sur sol toxique en aluminium soient 10,95 ± 6,59 cm et 8,34 ± 1,82 cm respectivement.

Ces observations rejoignent celles de Horst *et al.* (10) qui présentent l'apex racinaire comme étant la région la plus sensible à la toxicité aluminique. De nombreux travaux réalisés en laboratoire ont permis de déterminer que le premier dommage visible causé par l'aluminium est l'inhibition de l'élongation racinaire (10, 11, 12, 18, 23). La hauteur de la plante devrait être par conséquent réduite chez les variétés de maïs sensibles à la toxicité aluminique. C'est donc le cas de *Tuxpeño sequia* et *Exp₁ 24*.

Les résultats de l'analyse de la variance pour les paramètres nombre de feuilles (NF), diamètre de la tige (D tige), longueur de la tige (L tige), longueur de la racine séminale (LRS), nombre de ramifications racinaires (N ram) et poids sec des racines (PSR) ont montré que les interactions stade de développement (St) X traitements (Tr) X géotypes (Gén), ainsi que les interactions stades de développement X géotypes n'ont pas été significatives (Tableau 6). Ces résultats suggèrent que les différents géotypes se sont comportés de la même façon à 21 et à 35 jours après le semis tant sur le sol acide que sur le sol à acidité corrigée, pour tous ces paramètres mesurés. Ces résultats suggèrent également que les géotypes ont montré le même classement relatif tant sur sol acide que sur sol à acidité corrigée. Finalement, ces résultats montrent que le classement des géotypes a été le même à 21 et à 35 jours, suggérant qu'à 21 jours après le semis, les données obtenues permettaient déjà de discriminer les géotypes pour leur tolérance aux sols à acidité aluminique. Donc, le stade de développement semblait ne pas avoir un effet discriminatoire sur la performance des différents géotypes pour tous les paramètres mesurés. On note cependant que l'interaction traitements X géotypes a été hautement significative ($p < 0,001$) pour les paramètres hauteur de la plante et longueur de la racine séminale. Ces résultats suggèrent que la toxicité aluminique a affecté différemment la hauteur

Tableau 5
Caractéristiques morphologiques moyennes des géotypes de maïs 35 jours après le semis en pots: hauteur des plantes (HP) et longueur de la racine séminale (LRS), sur sol toxique en aluminium (E) et sur sol non toxique (T)

Géotypes	HP (cm)			LRS (cm)		
	E	T	% réduction	E	T	% réduction
<i>Tuxpeño sequia</i>	9,97 ± 2,27	17,65 ± 2,57	43,5	10,95 ± 6,59	33,80 ± 3,49	67,6
<i>ATP S₄ 25 W</i>	16,35 ± 2,86	16,88 ± 1,09	3,1	27,35 ± 3,39	28,23 ± 2,90	3,1
<i>Cam Inb gp₁ 17</i>	10,45 ± 2,86	15,89 ± 1,00	34,2	19,32 ± 2,67	24,19 ± 2,40	20,1
<i>Exp₁ 24</i>	9,98 ± 1,17	13,42 ± 2,23	25,6	8,34 ± 1,82	23,82 ± 3,19	65,0
Moyenne	11,69	15,96	26,8	16,49	27,52	40,1
ppds (0,05)	2,03	2,03		4,63	4,63	

Tableau 6

Carrés moyens issus de l'analyse de la variance des paramètres morphologiques mesurés en pots aux stades 21 et 35 jours après le semis

SV	ddl	NF	D tige	HP	LRS	N ram	PSR
Rép	2	0,91 *	2,47 **	10,21 *	5,18 NS	11,70 *	740,09 NS
St	1	19,64 ***	11,99 ***	70,55 ***	6,95 NS	163,56 ***	1920,54 *
Tr	1	15,52 ***	44,84 ***	179,66 ***	1440,37 ***	45,33 ***	764,19 NS
Gén	3	0,23 NS	0,23 NS	52,86 ***	328,33 ***	3,16 NS	1952,27 *
St x Gén	3	0,21 NS	0,59 NS	1,32 NS	18,11 NS	4,72 NS	286,50 NS
Tr x Gén	3	0,21 NS	1,06 NS	16,46 ***	267,97 ***	2,08 NS	46,23 NS
St x Gén x Tr	3	0,21 NS	0,02 NS	2,89 NS	3,20 NS	3,58 NS	230,18 NS
Erreur	6	0,23	0,4	2,16	11,66	3,17	497,93

SV= source de variation, Rép= répétitions, St= stade, Tr= traitement, Gén= génotypes, ddl= degrés de liberté, NF= nombre de feuilles, D tige= diamètre tige, HP= hauteur de la Plante, LRS= longueur racine séminale, N ram= nombre de ramifications, PSR= poids sec des racines, *= significatif à $p < 0,05$, **= significatif à $p < 0,01$, ***= significatif à $p < 0,001$, NS= non significatif

de la plante et la longueur de la racine séminale des différents génotypes. Ces deux paramètres peuvent donc être utilisés comme critères de sélection sur sols acides pour cribler les différents génotypes pour leur tolérance à la toxicité aluminique.

Le classement relatif des génotypes testés est resté le même à 21 jours et à 35 jours après le semis, suggérant que le mécanisme de la tolérance à la toxicité aluminique établi à un stade de croissance précoce reste le même à un stade avancé. Ces résultats diffèrent de ceux obtenus par Thé *et al.* (19), qui ont observé des interactions génotypes X stades de croissance. Ils ont observé qu'au stade 4-5 feuilles, certains génotypes de maïs se montraient sensibles pour ce qui est de l'inhibition de l'élongation de la racine séminale par la toxicité aluminique. Cette discordance peut être due au fait que les génotypes de maïs peuvent avoir des mécanismes différents de tolérance à la toxicité aluminique.

Les génotypes testés ont présenté des différences significatives pour la hauteur de la plante et pour la longueur de la racine séminale. Ces deux paramètres sont fortement réduits sur sol toxique en aluminium. L'inhibition de la croissance de la LRS sur sol acide toxique en aluminium a été démontrée par plusieurs auteurs (4, 13, 19, 20). Cette inhibition est beaucoup plus marquée chez les génotypes sensibles. Cependant, les génotypes tolérants exhibent les moindres réductions par rapport aux génotypes

sensibles. Ceci corrobore les résultats de Hans *et al.* (9). Donc, la longueur de la racine séminale et la hauteur de la plante peuvent servir de critères de sélection précoces utilisables lors du criblage des génotypes de maïs tolérants à l'acidité aluminique.

Tuxpeño sequia et *Exp₁ 24* se sont révélés sensibles à la toxicité aluminique par les deux essais alors que *ATP S₄ 25W* et *Cam Inb gp₁ 17* ont plutôt été classés tolérants à la toxicité aluminique par ces expériences.

Conclusion

La longueur de la racine séminale et la hauteur de la plante, évaluées à 21 jours après le semis en pots peuvent être efficacement utilisées comme critères précoces de sélection des génotypes de maïs pour leur tolérance à l'acidité aluminium.

Les génotypes de maïs connus tolérants et ceux nommés sensibles à la toxicité aluminique ont été confirmés tels quels en champ. Les paramètres utilisés pour la discrimination étaient la hauteur de l'insertion de l'épi, la hauteur de la plante et le rendement en grains, paramètres qui ne peuvent cependant être mesurés qu'à maturité et qui demandent donc un temps et un investissement expérimental nettement supérieurs à des expériences de courte durée en pots.

Références bibliographiques

- Adregbola P., 1994, Expérience et acquis paysans au Sud du Bénin. In: CIRAD (ed). Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest. CIRAD-ORSTOM. pp. 14-19.
- Aldrich S.R., Scott W.O. & Leng E.R., 1975, In modern corn production. Champain, I.L.A & L Publication.
- Anonyme, 1993, Mémento de l'agronome. Ministère de la Coopération. Paris. pp. 145-146.
- Borrero J.C., Pandey S., Ceballos H., Mangnavaca R. & Bahia A.F.C., 1995, Genetic variances for tolerance to soil acidity in tropical maize population. Maydica, 40, 283-288.
- Brewbaker J.L., 1985, The tropical environment for maize cultivation. In: Breeding strategies for maize production improvement in the tropics. Eds. A. Brandolini and F. Salamini. pp.44-77. Food and agriculture of UN. Instituto Agronomico per l'Oltremare, firenze, Italy.
- Clark R.B., 1997, Effect of aluminium on growth and mineral elements of Al-tolerant corn. Plant Soil, 47, 653-662.
- Claudia L., 2000, Field and laboratory screening of maize (*Zea mays* L.) cultivars for adaptation on an acid Al-toxic Soil in Guadeloupe. Diploma thesis. University of Hannover. 71p.
- Eswaran H., Reich P. & Beigroth F., 1997, Global distribution of soils with acidity. In plant soil interaction at low pH. Ed. A.C. Monitz. pp.159-164. Brazilian Soil Science Society, Campines Brazil.

9. Hans L., Stuart F.C. & Thij L.P., 1998, Plant physiological ecology. Printed In USA. pp. 239-298.
10. Horst W.J., Püschel A.K. & Schmoll N., 1997, Induction callose formation is a sensitive marker for genotypic aluminium sensitivity in maize. *In*: Schaffert R. and Moniz A. (eds) Plant Soil Interaction at low pH. Kluwer Acad. Publ. Netherlands. Plant soil. 192: 23-30.
11. Kollmeier M., Felle H.H. & Horst W.J., 2000, Genotypical differences in the distal part of the transition zone. is reduced basipetal auxin flow involved in inhibition of root elongation by aluminium? *Plant Physiol.* **122**, 3, 945-956.
12. Llugany M., Massot N., Wissemeier H.A., Posscheriender C., Horst W.J. & Barcelo J., 1994, Aluminium tolerance of maize cultivars as assessed by callose production and root elongation. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **157**, 447-451.
13. Mekoak M., 2001, Identification des cultivars de maïs (*Zea mays* L.) tolérants aux sols acides de la zone forestière humide du Cameroun. Mémoire DESS, Université de Yaoundé I. 60 p.
14. Narro L., Pandey S., Crossa J., De Léon C. & Salazar F., 2003, Using line x tester interaction for the formation of yellow maize synthetics tolerant to acid soils. *Crop Sci.* **43**, 1718-1728.
15. Nwaga D., Ngonkeu E.L.M., Oyong M.M., Ngakou A., Abelong M. & Foko J., 2000, In soil beneficial microorganism and suitable agriculture production in Cameroon. Current research and perspectives. *In*: The biology and fertility of tropical soils. TSBF report 1997-1998. pp. 62-63.
16. Oloumane N.J., 2000, Les mycorhizes comparés aux engrais minéraux pour la production du maïs (*Zea mays* L.) sur les sols acides en zone de forêt humide du Cameroun. Mémoire DESS, Université de Yaoundé I. 65 p.
17. Pandey S. & Gardner C.O., 1992, Recurrent selection for population, variety and hybrid improvement in the tropical maize. *Adv.Agron.* **48**, 81-87.
18. Sivaguru M. & Horst W.J., 1998, The distal part of the transition zone is the most aluminium sensitive apical root zone of *Zea mays* L. *Plant physiol.* **116**: 155-163.
19. Thé C., Horst W.J., Calba C., Welcker C. & Zonkeng C., 1999, Identification and development of maize genotypes adapted to acid soil of the tropics. *In*: Bau- Apraku B., Fakorede M.A.B., Ouedraogo and Carsky R.J. (eds). Impact, challenges and prospects of maize research and development in West Central Africa. pp. 107-127.
20. Thé C., Mafouasson H.A., Calba H., Mbouemboue P., Zonkeng C. & Horst W.J. 2006, Identification de groupes hétérotiques pour la tolérance du maïs (*Zea mays* L.) aux sols acides des tropiques. *Cahiers Agricultures.* Vol. **15** :337-346.
21. Van Ranst E., Verloo M., Demeyer A. & Pauwels J.M., 1999, Manual for the soil chemistry and fertility laboratory. Analytical methods for soils and plants equipment and management of consumables. University of Ghent. Laboratory of Analytical Chemistry and Applied Ecochemistry.
22. Welcker C., Thé C., De Leon C., Parentoni S.N., Bernal J., Félicité J., Zonkeng C., Salazar F., Narro L. & Horst W.J., 2005, Heterosis and combining ability for adaptation of maize to acid soils: implication for future breeding strategies. *Society of America. Crop Science*, **42**, 2405-2413.
23. Wissemeier A.H., Klotz F. & Horst W.J., 1987, Aluminium induced callose synthesis in roots of soybean (*Glycine max* L.) *J. Plant Physiol.* **129**, 487-492.

Delphine Mapiemfu-Lamaré, Camerounaise, Titulaire d'un Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en Biologie végétale option Biotechnologies Végétales. Spécialité: Biotechnologies végétales. Jeune chercheur au Programme Cultures Annuelles à l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD). mapidelph@yahoo.com2.

C. Thé, Camerounais, Docteur, PhD en Plant Breeding and Genetics, North Dakota State University (USA Fargo). Enseignant à l'University of Yaoundé I et University of Ghana (West African Center for Crop Improvement). charlesthe@hotmail.com3.

Yvette clarisse Mfopou Mewouo, Camerounaise, Titulaire d'un DEA en Sciences Géotechniques et Hydrotechniques, Spécialité: Science de l'Eau et de l'Environnement; chercheur au programme Sol, Eau et Atmosphère de l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD). mfopou2001@yahoo.com4.

E. Tsoata, Camerounais, Docteur de 3^{ème} cycle, Chargé de cours à l'Université de Yaoundé I (Cameroun), Faculté des Sciences, Département de Biologie et Physiologie Végétales. Unité de recherche: Ecophysiologie et Biorémédiation. Spécialités : Nutrition hydrominérale des plantes, Ecophysiologie des plantes, Biorémédiation, production végétale et milieux aquatiques d'eaux douces. tses60@yahoo.fr5.

C. Zonkeng, Camerounais, titulaire d'un Master Degree. Spécialité: Sélection /Amélioration des plantes. Chargé de recherche dans le programme culture annuelles à l'IRAD. czonkeng@yahoo.fr