

Identification de groupes hétérotiques pour la tolérance du maïs (*Zea mays* L.) aux sols acides des tropiques

Charles Thé¹
Hortense Mafouasson¹
Henri Calba³
Paul Mbouemboue²
Célicard Zonkeng¹
Appolinaire Tagne¹
Walter J. Horst⁴

¹ Institut de recherche agronomique pour le développement (Irad), BP 2067, Yaoundé, Cameroun
<charlesthe@hotmail.com>

² Faculté d'agronomie et des sciences Agricoles (FASA), Dschang, Cameroun
<mafouasson@yahoo.fr>

³ Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), TA40/01, Avenue d'Agropolis, 34398 Montpellier cedex
<henri.calba@cirad.fr>

⁴ University of Hannover, Herrenhaeuser Str. 2 D, 30419 Hannover, Allemagne
<horst@mbox.Pflern.uni-hannover.de>

Résumé

Trente-huit hybrides de maïs (*Zea mays* L.) issus des croisements entre 19 lignées endogames tropicales avec deux testeurs hétérotiques et cinq variétés témoins ont été évalués en 1999 et 2000 pour leur tolérance aux sols acides dans deux localités (Ebolowa et Nkolbisson) du Cameroun. L'acidité du sol à Ebolowa est liée à une toxicité aluminique alors qu'à Nkolbisson elle est liée à une toxicité manganique. Les objectifs de cette étude étaient, d'une part, d'évaluer les effets des gènes de certaines lignées endogames sur sol acide afin de les classer en pools hétérotiques et, d'autre part, d'identifier les meilleurs hybrides pour chacun des types de sol acide. Les résultats obtenus sur les huit environnements ont montré que pour le paramètre rendement, la tolérance du maïs aux deux types de sol acide était contrôlée tant par des gènes à effets additifs que par des gènes à effets non additifs, avec prédominance des gènes à effets non additifs sur sol acide à toxicité aluminique et des gènes à effets additifs sur sol acide à toxicité manganique. Pour le paramètre longueur de la racine séminale, la tolérance aux deux types d'acidité de sol était beaucoup plus sous l'action des gènes à effets additifs. Sur les sols acides à toxicité aluminique, six hybrides ainsi que dix géniteurs ont été identifiés pour leur tolérance. Six autres hybrides ainsi que cinq géniteurs ont présenté des potentialités pour leur utilisation sur des sols à toxicité manganique. Les hybrides performants sur les deux types de sol acide ont été Cam inb gp1 17 x 87036 et Entrada 29 x 87036. Les meilleurs géniteurs pour les deux types d'acidité de sol ont été Cam inb gp1 17, ATP S4 25 W, CMLci-IDR-STR, 87036 M131 et CML 357. À l'issue de cette étude, deux pools hétérotiques ont été proposés pour chacun des types de sol acide. La composition de ces pools diffère d'un type d'acidité de sol à l'autre. Sur sol acide à toxicité aluminique, la longueur de la racine séminale a été efficace dans l'identification des génotypes performants sur sol acide. Elle a été inefficace sur sol acide à toxicité manganique. Il a été conclu que le mécanisme contrôlant la tolérance aux sols acides différait d'un type d'acidité à l'autre.

Mots clés : maïs ; ph du sol ; zone tropicale ; rendement ; manganèse ; aluminium.

Thèmes : productions végétales ; ressources naturelles et environnement, sol.

Abstract

Identification of heterotic groups for the tolerance of maize (*Zea mays* L.) for tropical acid soils

Thirty-eight maize (*Zea mays* L.) hybrids, from crossings of 19 inbred tropical lines with two heterotic testers and five control varieties, were evaluated in 1999 and 2000 for their tolerance for acid soils at two sites (Ebolowa and Nkolbisson) in Cameroon. The acid soils at Ebolowa and Nkolbisson are related to aluminum and manganese toxicity, respectively. The objectives of this study were to assess the effects of the genes of some inbred lines on acid soil in order to classify them into heterotic groups and identify the best hybrid for each type of soil. The results for the eight environments tested showed that the effect on yield of the two types of acid soils was associated with both additive and nonadditive gene action, with the latter predominant for the soil with aluminum toxicity and the former for the soil with manganese toxicity. Length of the seminal root was affected much more by additive gene action in both types of acid soil. Six hybrids and ten progenitors were identified as most tolerant of acid soil with aluminum toxicity. Six other hybrids and five progenitors showed good potential for use on soils with manganese toxicity. Two hybrids were effective on both soil types: Cam inb gp1 17 x 87036 and Entrada 29 x 87036. The

Tirés à part : C. Thé

best progenitors for both types were: Cam inb gp1 17, ATP S4 25 W, CMLci-IDR-STR, 87036 M131 and CML 357. When this study was concluded, two heterotic groups were proposed for each type of acid soil. The composition of these groups was different for each. For the soil with aluminum toxicity, length of seminal root can be an efficient indicator for identifying genotypes tolerant of acid soil. It was not efficient, however, for the soil with manganese toxicity. We concluded that the mechanism controlling tolerance to acid soils differs between types of acidity.

Key words: maize; soil ph; tropics; yields; manganese; aluminium.

Subjects: vegetal productions; natural resources and environment; soil.

Les sols acides couvrent près de 30 % de la surface mondiale des terres arables. Dans les tropiques, l'Afrique a 8,8 millions de km² de terres acides, soit 29 % du continent (Eswaran *et al.*, 1997).

Fréquemment liée aux toxicités en aluminium, manganèse et fer, ou à des déficiences en phosphore, calcium, magnésium et molybdène, l'acidité du sol est une des causes importantes des faibles rendements du maïs (Granados *et al.*, 1993). Cette acidité peut être corrigée par des amendements calciques ou par application de matière organique. Toutefois, ces méthodes sont onéreuses et souvent inaccessibles pour les paysans des pays en développement. Le développement de cultivars tolérants aux sols acides est une méthode durable, moins coûteuse et plus respectueuse de l'environnement qui peut permettre d'accroître les rendements des cultures sur les sols acides (Bennet *et al.*, 1986 ; Pandey et Gardner, 1992).

Des travaux antérieurs sur l'héritabilité des gènes de tolérance du maïs à l'acidité du sol ont montré que les cultivars de maïs présentent une grande variabilité pour ce caractère. La tolérance du maïs à l'acidité du sol est contrôlée par des gènes majeurs (Rhue *et al.*, 1978 ; Miranda *et al.*, 1984) et le mode d'action des gènes est quantitatif (Magnavaca *et al.*, 1987 ; Duque-Vargas *et al.*, 1994 ; Pandey *et al.*, 1994). Selon certains auteurs, la variance génétique additive est généralement plus importante pour la tolérance du maïs aux sols acides (Magnavaca *et al.*, 1987 ; Pandey *et al.*, 1994). D'autres estiment que la variance génétique non additive est prédominante dans la détermination des rendements du maïs sur sol acide (Duque-Vargas *et al.*, 1994 ; Borrero *et al.*, 1995 ; Salazar *et al.*, 1997). Ainsi, dans le processus d'amélioration, la méthode de sélection la plus appropriée serait la formation de pools

hétérotiques et leur amélioration par la sélection récurrente réciproque.

En Afrique subsaharienne, et au Cameroun en particulier, malgré les efforts fournis pour le développement d'hybrides de maïs adaptés aux sols acides, le progrès est freiné par le peu de connaissances sur le comportement hétérotique des lignées endogames disponibles. La performance relative des lignées endogames croisées aux testeurs connus et génétiquement divergents a été utilisée par certains auteurs (Hallauer *et al.*, 1988 ; Vasal *et al.*, 1992a et 1992b ; Thé *et al.*, 1991) pour classer les lignées en pools hétérotiques.

Le pourcentage relatif d'élongation de la racine séminale a été largement utilisé comme indicateur précoce de tolérance à l'aluminium dans le criblage des variétés en solution nutritive et dans les bioessais sur sols acides (Howeler et Cadavid, 1976 ; Collet et Horst, 2001 ; Llugany *et al.*, 1995). Toutefois, les mécanismes d'inhibition de l'élongation de la racine par l'aluminium n'ont pas encore été clairement déterminés.

La présente étude avait pour but d'évaluer les hybrides issus du croisement de 19 lignées endogames de maïs avec deux testeurs (87036 et 88094) choisis en raison de la performance de croissance des croisements F1 sur sol acide. Cette évaluation devait permettre la détermination des effets des gènes des lignées endogames sur sols acides ainsi que la classification de ces lignées dans des pools hétérotiques. Le second objectif était l'identification des hybrides tolérants pour chacun des deux types de sols acides (acidité aluminique et acidité manganique) rencontrés au Cameroun.

Ce travail constitue la base d'un programme de développement de cultivars de maïs adaptés aux sols acides de l'Afrique au sud du Sahara et en particulier du Cameroun.

Matériel et méthode

Le matériel végétal utilisé pour cette étude était constitué de 38 hybrides *topcross* issus de croisements entre 19 lignées endogames tropicales, avec 2 testeurs (88094 et 87036), et de 5 variétés témoins, composées de 2 variétés composites (CMS 8704 et CMS 8501) et de 3 hybrides (8321-18 x EXP₁24 ; 87036 x 88094 ; et 87036 x 91105).

Les caractéristiques des lignées endogames et des testeurs utilisés dans les croisements sont présentées au *tableau 1*. Les 6 lignées du *Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo* (CIMMYT, Centre international pour l'amélioration du maïs et du blé) provenaient de populations rattachées aux groupes hétérotiques Eto et Tuxpeño. Les lignées de l'Institut de recherche agronomique pour le développement (Irad) Cameroun, adaptées aux altitudes moyennes (entre 1 000 et 2 500 m) étaient extraites de croisements variétaux entre la variété TZM-SR de l'*International Institute of Tropical Agriculture* (IITA) et les populations 32 (Eto) et 43 (Tuxpeño) du CIMMYT. Les lignées de basse altitude (< 1 000 m), provenaient de croisements variétaux entre la variété TZB-SR de l'IITA et les populations 32 et 43 du CIMMYT. Les deux testeurs 87036 et 88094 provenaient de rétrocroisements (BC₃F₁) entre la variété TZM-SR de l'IITA et les populations 32 (Eto) et 42 (Tuxpeño) du CIMMYT. L'essai constitué de 43 génotypes a été mis en place dans deux localités situées en zone de basse altitude. Les caractéristiques de ces sites sont les suivantes :

– Nkolbisson (11°36' E ; 3°44' N) : la température moyenne annuelle est de 23,5 °C, la pluviosité est bimodale, sa moyenne annuelle est de 1 560 mm ; le sol est à texture argilo-limoneuse avec une forte tendance à l'hydromorphie ;

Tableau 1. Origine institutionnelle, génétique et hétérotique apparentée, adaptation, couleur et caractéristiques présumées des lignées et des testeurs.

Table 1. Origins, presumed heterotic pattern, adaptation, color, and presumed characteristics of the inbred lines and testers.

Variétés	Origine institutionnelle	Origine génétique	Origine hétérotique	Adaptation	Couleur du grain	Comportements présumés	
						Ebolowa	Nkolbisson
Lignées							
CML 357	CIMMYT	Pop SA3	Eto	Basses alt	Jaune		S
CML 365	CIMMYT	Pop SA8	Tuxpeño	Basses alt	Jaune	T	S
Entrada 29	CIMMYT	Pop SA6	Tuxpeño	Basses alt	Blanche	T	M
Entrada 3	CIMMYT	Pop SA7	Eto	Basses alt	Blanche	M	M
ATP- S4-25W	Irad	ATP-SR	-	Basses alt	Blanche	T	T
M 131	Irad	TZMSr x pop32	-	Basses alt	Blanche	T	T
Lap 5	IITA/CIMMYT	La posta	Tuxpeño	Basses alt	Blanche	M	M
EXP ₁ 24	Irad	Pop43xTZBSR	-	Basses alt	Blanche	M	S
CAMlgp ₁ 17	Irad	Suwani-SR	-	Basses alt	Jaune	S	T
EXP ₁ 42	Irad	Pop43xTZBSR	-	Basses alt	Blanche	T	S
HLM I 9	Irad	TZMSr x pop32	-	Moyennes alt	Blanche	S	M
1368	IITA	pop21	Tuxpeño	Basses alt	Blanche	T	M
NCRE gp ₂ 8	Irad	Pop43xTZBSR	-	Basses alt	Blanche	M	T
90 301	Irad	TZMSR x pop43	-	Moyennes alt	Blanche	T	M
NCRE gp ₃ 59	Irad	TZBSR x pop32	-	Basses alt	Blanche	S	M
CMLciDRSTR	CIMMYT	Pop43	Tuxpeño	Basses alt	Blanche	M	M
EXP ₁ 23	Irad	Pop43xTZBSR	-	Basses alt	Blanche	M	S
NCRE gp ₁ 107	Irad	Pop43xTZBSr	-	Basses alt	Blanche	T	M
ATP S4-9-W	Irad	ATP-SR	-	Basses alt	Blanche	M	T
Testeurs (1)						T	
87036	Irad	TZMSr x pop32	Eto	Moyennes alt	Blanche		T
88094	Irad	TZMSr x pop43	Tuxpeño	Moyennes alt	Blanche	T	M

T : tolérant ; S : susceptible ; M : tolérance moyenne ; pop : population ; source : Cameroon Inco Annual report year 1999 ; alt : altitude ; (1) les lignées 87036 et 88094 obtenues sur les BC3 F1 (après 3 rétrocroisements respectivement avec pop 32 et pop 43) ; CIMMYT : Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (Centre international pour l'amélioration du maïs et du blé) ; Irad : Institut de recherche agronomique pour le développement ; IITA : International Institute of Tropical Agriculture.

– Ebolowa (2°40'N 12°24'E) : la température moyenne annuelle est de 24 °C, la pluviosité est également bimodale avec une moyenne annuelle de 1 875 mm, et le sol est à texture argileuse.

Les deux sites sont distants d'environ 180 km l'un de l'autre.

Les analyses de sol réalisées par le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) à Montpellier (tableau 2) ont montré qu'à Nkolbisson, l'acidité du sol est caractérisée par une toxicité en manganèse avec un taux de saturation de 31 % de 0 à 10 cm de profondeur, et de 10 % entre 10 et 20 cm de profondeur. L'acidité des sols à Ebolowa est caractérisée par une toxicité en aluminium avec un taux de saturation de 46 % dans les premiers 10 cm et de 56 % entre 10 à 20 cm de profondeur. Le pH eau est situé entre 4,18 et 4,86 à Nkolbisson tandis qu'à Ebolowa il ne dépasse guère 4,1.

Dans chaque site, l'essai a été mis en place en utilisant le *split block* comme dispositif expérimental. La parcelle principale (bloc) était constituée de deux traitements (O et T). Le traitement O correspondait à la parcelle acide (sol non corrigé). Le traitement T correspondait à la parcelle acide corrigée. La correction de l'acidité a consisté en l'épandage de 2 tonnes à l'hectare de dolomie et de 4 tonnes à l'hectare de fumier de poule composé de 82,5 % de matière sèche (MS), 3,53 % d'azote (N), 0,70 % de magnésium (Mg), 2,10 % de calcium (Ca), 2,43 % de potassium (K) et 1,73 % de phosphore (P). Le pH eau du fumier était de 7,2.

La parcelle secondaire était constituée des génotypes disposés en blocs de Fisher. Chaque essai comportait trois répétitions. La parcelle élémentaire était une ligne de 5 m de long.

Le maïs a été semé sur des lignes espacées de 0,75 m. La distance entre deux poquets sur la même ligne était de 0,5 m. La densité de semis était de 53 333 plantes/ha.

Les engrais minéraux ont été apportés aux parcelles O et T à raison de 100 kg de phosphate d'ammonium (DAP) 18-45-0, de 50 kg à l'hectare d'urée (46 %) appliquée 10 jours après le semis et de 100 kg à l'hectare d'urée épandue 30 jours après le semis.

Les caractères mesurés ou calculés dans cette étude ont été les suivants :

- le nombre de jours du semis à l'apparition des soies, ici appelé floraison femelle (FF) ;
- le nombre de jours entre la floraison mâle (FM) et la FF, ici appelé ASI (*anthesis-silking-interval*) ;
- l'élongation de la racine séminale (LRS) : cette mesure a permis de déterminer le pourcentage de perte relative

Tableau 2. Résultats de l'analyse des sols d'Ebolowa et de Nkolbisson réalisée en 1998 par le laboratoire du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad, Montpellier).

Table 2. 1998 Ebolowa and Nkolbisson soil analysis performed by the laboratory of the Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad, Montpellier).

Caractéristiques des sols (1)	Ebolowa		Nkolbisson	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
Ca cmol ₍₊₎ /kg	0,80	0,56	1,19	2,70
Mg cmol ₍₊₎ /kg	0,50	0,31	0,47	1,39
K cmol ₍₊₎ /kg	0,14	0,11	0,23	0,59
Na cmol ₍₊₎ /kg	0,05	0,05	0,05	0,05
Al cmol ₍₊₎ /kg	1,44	1,06	0,55	0,00
Mn cmol ₍₊₎ /kg	0,04	0,05	1,19	0,55
H cmol ₍₊₎ /kg	0,16	0,16	0,16	0,16
CEC cmol ₍₊₎ /kg	3,54	3,32	4,12	5,46
PH eau (2)	4,09	4,10	4,18	4,86
T _{SA} (%)	46	56	14	0
Conclusion	Toxicité aluminique		Toxicité manganique	

(1) éléments échangeables extraits par la méthode cobaltihexamine (Orsini et Rémy, 1976) ; (2) ratio sol:eau 1:2,5.

(%PRP) de l'élongation de la racine séminale due à l'acidité des sols à partir de la formule suivante :

$$\% PRP = \frac{LRS (T) - LRS (O)}{LRS (T)} \times 100$$

Où :

LRS (O) = mesure de la longueur de la racine séminale 3 semaines après semis sur parcelle acide ;

LRS (T) = mesure de la longueur de la racine séminale 3 semaines après semis sur parcelle corrigée ;

– le rendement grain à l'hectare calculé à 15 % d'humidité ;

– le pourcentage relatif de perte de rendement calculé de la même manière que celui de la longueur de la racine séminale. Pour chacun des types d'acidité de sol, une analyse préliminaire de la variance combinée sur les deux années et les deux traitements de sol (O, T) a été faite.

L'étude du comportement relatif des génotypes sur les différentes situations d'acidité de sol étant un des objectifs majeurs de cette étude, les effets dus aux deux années et les effets dus aux deux types d'amendements des sols sur les deux sites ont été combinés et considérés comme effets aléatoires dus à l'environnement, afin de tester nos hybrides sur plusieurs situations d'acidité de sol. Les

effets dus aux différents génotypes testés ont été considérés comme des effets fixes.

L'analyse de la variance a été ensuite faite sur les huit environnements ayant chacun trois répétitions pour tous les paramètres étudiés. Cela a permis de déceler les interactions entre les différents environnements et les génotypes évalués. Ensuite, une analyse de la variance par site a permis de détecter les effets de chaque type d'acidité du sol sur le comportement des génotypes.

La comparaison des moyennes a été faite par la méthode de la plus petite différence significative (ppds) aux seuils de 1 % et 5 %.

Les effets des gènes ont été estimés en faisant pour chaque site une partition orthogonale de la somme des carrés des écarts des 38 *topcross*, en effets dus aux lignées, effets dus aux testeurs, et effets dus à l'interaction lignées x testeurs (Kempthorne, 1957).

Les aptitudes générales et spécifiques à la combinaison (AGC et ASC) ont été calculées à partir de la méthode de Kempthorne (1957).

La classification des lignées endogames dans des pools hétérotiques a été réalisée en utilisant les ASC des F1 les plus performants sur sol acide (Vasal *et al.*, 1992a et 1992b).

Résultats et discussion

Pour chacun des sites, l'analyse préliminaire de la variance (non présentée) combinée sur les deux années et les deux traitements de sol (O et T) a montré des différences significatives ($p < 0,01$) des effets des années et des traitements. Les effets des années étaient probablement dus aux 10 jours de sécheresse observés en l'an 2000 sur les deux sites pendant la culture, effets qui ont réduit les rendements par rapport à 1999. L'interaction années x génotypes était non significative, suggérant que pour chacun des sites, les *topcross* avaient le même comportement relatif d'une année à l'autre.

L'analyse de la variance à travers les huit environnements indique que des différences dues aux effets des environnements et des différences entre les génotypes sont hautement significatives ($p < 0,01$) pour tous les paramètres mesurés (tableau 3). Il en est de même pour toutes les interactions environnements x génotypes. Ces résultats suggèrent que les hybrides testés diffèrent les uns des autres et se comportent différemment d'un type d'acidité à l'autre. L'amendement du sol avec la chaux dolomitique et la fiente de poule a permis de créer des situations d'acidité de sol permettant de discriminer de façon effective les génotypes tolérants et susceptibles aux sols acides.

Le tableau 4 présente l'analyse de la variance par type d'acidité de sol (site). Il en ressort qu'à Ebolowa et à Nkolbisson, les effets dus aux environnements et aux génotypes testés présentent des différences hautement significatives ($p < 0,01$) pour tous les caractères étudiés à l'exception du rendement en grains à Nkolbisson, et de ASI et LRS à Nkolbisson et Ebolowa.

Les interactions génotypes x environnements sont significatives pour les paramètres rendement, longueur de la racine séminale et floraison femelle à Ebolowa et pour les paramètres rendement et longueur de la racine séminale à Nkolbisson. Ces résultats suggèrent que les caractères rendement et longueur de la racine séminale peuvent servir de critères pour cribler les génotypes sur la tolérance aux différents types de sols acides.

Les tableaux 5 et 6 présentent les performances moyennes des hybrides sur sols acides pour les paramètres mesurés respectivement à Ebolowa et Nkolbisson. Les tableaux montrent que sur les sols acides, les rendements ainsi que la crois-

Tableau 3. Carrés moyens pertinents issus de l'analyse de la variance combinés sur les huit environnements pour quatre paramètres (1).

Table 3. Pertinent mean squares from the analysis of variance across eight environments for four parameters (1).

Sources de variations	ddl	Rdt	FF	ASI	LRS
Environnements (Env)	7	1108,69**	490,33**	63,49**	5483,14**
Rep/Env	16	1,63	3,32	2,21	9,85
Génotypes (Gen)	42	12,51**	39,35**	5,20**	50,95**
Env x Gen	294	6,89**	11,42**	3,65**	27,60**
Erreur	672	1,89	4,72	2,15	6,74

(1) Rdt : rendement ; FF : floraison femelle ; ASI : durée de l'intervalle entre floraison mâle et floraison femelle (*anthesis-silking-interval*, ASI) ; LRS : longueur de la racine séminale ; Ddl : degré de liberté ; ** : significatif à $p < 0,01$; * : significatif à $p < 0,05$.

sance de la racine séminale sont réduits. Des résultats similaires ont été obtenus par ailleurs (Duque-Vargas *et al.*, 1994 ; Pandey *et al.*, 1994 ; Borrero *et al.*, 1995 ; Howeler et Cadavid, 1976 ; Collet et Horst, 2001 ; Llugany *et al.*, 1995).

À Ebolowa (tableau 5), sur sol acide à toxicité aluminique, 9 *topcrosses* ont eu des rendements égaux ou supérieurs au témoin 88094 x 87036 (3,4 t/ha). Sur sol corrigé, 11 *topcrosses* ont présenté des rendements supérieurs ou égaux à celui du témoin (5,3 t/ha). Parmi ces 11 *topcrosses*, 7 peuvent être retenus pour leur tolérance sur sol acide. Il s'agit de : Entrada 29 x 87036, ATP-S4-25-W x 87036, Lap5 x 87036, Exp₁ 24 x 87036, Cam inb gp₁ 17 x 87036, ATP-S4-25-W x 88094, et 90301 x 88094.

Le pourcentage relatif de perte de rendement (%PRP) due à l'acidité du sol à Ebolowa, également présenté au tableau 5, montre que 14 hybrides ont eu des pertes relatives de rendement égales ou inférieures à la perte de rendement du témoin (87036 x 88094) qui était de 36 %. Ces hybrides peuvent être considérés comme tolérants aux sols acides à toxicité aluminique. Parmi ces 14 hybrides, 6 d'entre eux, à savoir Entrada 29 x 87036, ATP-S4-25W x 88094, Cam inb gp₁17 x 87036,

90301 x 88094, Exp₁ 24 x 87036 et Lap5 x 87036 ont été retenus pour leurs bonnes performances tant sur sol acide que sur sol corrigé. Les performances de ces *topcrosses* suggèrent que le développement d'hybrides hautement productifs aussi bien sur sol acide à toxicité aluminique que sur sol non acide et présentant des faibles pertes en rendement dues à l'acidité est possible.

Le tableau 5 présente également les mesures de l'élongation racinaire sur sol acide et sur sol corrigé ainsi que le pourcentage relatif de perte de cette élongation due à l'acidité des sols. Ces mesures montrent que, sur sol acide, l'élongation de la racine séminale a été en général réduite. Ces résultats sont conformes à ceux rapportés en solution hydroponique (Howeler et Cadavid, 1976 ; Collet et Horst, 2001 ; Llugany *et al.*, 1995). Cependant, 10 hybrides ont réagi sur sol acide avec une croissance de leur racine séminale comparable à celle obtenue sur sol corrigé. Ce résultat peut être dû soit à la variabilité des sols en champ, soit à un mécanisme de tolérance différent.

En utilisant l'élongation racinaire en présence de l'aluminium échangeable comme critère de sélection pour la tolérance aux sols acides (tableau 5),

13 hybrides présentent des pourcentages de pertes relatives égaux ou inférieurs à celui du témoin (29 %) et peuvent être classés comme tolérants. Les 6 hybrides retenus plus haut figurent dans cette sélection. Ce résultat confirme que la longueur de la racine séminale peut être utilisée pour ces matériels en champ au stade juvénile comme critère de criblage des variétés tolérantes aux sols acides à toxicité aluminique, sans perte d'informations.

À Nkolbisson (tableau 6) où l'acidité du sol est liée à une toxicité manganique, les rendements moyens sur sol acide sont en général plus élevés qu'à Ebolowa (3,3 t/ha contre 2,8 t/ha). Cela s'explique en partie par le fait que plusieurs des lignées utilisées dans cette étude ont été développées à Nkolbisson et sont par conséquent mieux adaptées aux sols acides à toxicité manganique. À Nkolbisson, les rendements des hybrides sur sol corrigé (5,1 t/ha) sont aussi plus élevés que sur sol acide (3,3 t/ha) et les hybrides présentent une longueur de la racine séminale plus réduite sur sol acide (9,0 cm) que sur sol corrigé (12,9 cm) (tableau 5). Ces résultats suggèrent que la toxicité manganique produit les mêmes

Tableau 4. Carrés moyens issus de l'analyse de la variance par type d'acidité du sol.

Table 4. Mean squares from the analysis of variance for each acid soil types.

Sources de variations	Ddl	Rdt		FF		ASI		LRS	
		Ebolowa	Nkolbisson	Ebolowa	Nkolbisson	Ebolowa	Nkolbisson	Ebolowa	Nkolbisson
Environnements (Env)	3	5,29 NS	2,74**	58,18**	17,21**	12,56 NS	0,29 NS	1,81 NS	7,42 NS
Rep/Env	8	2,74	0,51	2,80	3,84	4,23	0,18	4,86	148,43
Génotypes	42	4,90**	14,49**	25,72**	25,03**	7,55**	1,29**	52,67**	25,84**
Erreur	336	1,78	1,99	5,52	3,90	3,65	0,63	2,08	11,38

** : significatif à $p < 0,01$; * : significatif à $p < 0,05$; NS : non significatif.

Tableau 5. Performances moyennes des lignées en croisement sur sol acide à toxicité aluminique à Ebolowa.

Table 5. Mean performances of the testcrosses on aluminium toxic soil at Ebolowa.

Lignées	O				T				%PRP			
	87036		88094		87036		88094		87036		88094	
	RDT tonne/ha	LRS cm	RDT tonne/ha	LRS cm	RDT tonne/ha	LRS cm	RDT tonne/ha	LRS cm	RDT	LRS	RDT	LRS
CML357	2,9	3,1	2,5	3,3	5,0	5,8	4,7	6,1	42	47	47	46
CML365	2,9	3,6	2,1	3,4	6,9	5,3	4,6	7,8	58	32	54	56
Entrada 29	3,5	7,0	2,5	1,7	5,3	9,3	5,6	2,3	34	25	55	26
Entrada 3	2,3	4,2	2,6	4,0	4,9	4,9	5,9	4,7	53	14	56	15
ATP-S4-25W	3,6	5,2	4,1	4,9	6,1	5,6	5,6	6,5	41	7	27	25
M131	2,6	3,2	2,1	3,5	4,4	8,5	4,2	6,5	41	62	50	46
Lap5	3,4	4,7	3,6	4,7	5,7	5,2	5,0	5,2	40	10	28	10
Exp ₁ 24	3,7	4,0	2,0	3,0	5,3	5,6	4,4	6,1	30	29	55	51
Cam inb gp ₁ 17	3,5	3,8	3,4	4,8	5,5	5,0	4,4	3,7	36	24	23	-30
Exp ₁ 42	3,1	4,0	1,6	6,6	4,4	2,5	3,3	9,7	30	-60	52	32
HLM1 9	2,6	6,0	2,5	8,1	4,1	4,8	3,7	6,1	37	-25	32	-33
1368	2,8	6,3	2,7	1,5	4,9	10,9	3,2	6,6	43	42	16	77
NCRE gp ₂ 8	3,0	3,5	1,5	2,3	4,1	5,2	4,6	3,1	27	33	67	26
90301	2,1	3,0	4,1	5,2	3,6	2,5	5,3	7,0	42	-20	23	26
NCRE gp ₃ 59	3,1	2,0	3,0	8,3	5,1	1,6	5,0	14,4	39	-25	40	42
CMLCI-IDR-STR	3,1	3,2	2,6	4,9	4,5	5,4	4,5	6,8	31	41	42	28
Exp ₁ 23	1,6	10,5	2,1	12,5	4,7	5,6	3,8	7,5	66	-88	45	-67
NCRE gp ₁ 107	2,3	4,8	1,5	6,3	5,4	11,0	4,1	13,7	57	56	63	54
ATP- S4-9W	2,7	7,1	2,3	7,1	3,6	3,3	2,8	2,3	25	-115	18	-209
Témoin												
88094 x 87036			3,4	4,8			5,3	6,8			36	29
Moyenne du testeur	2,9	4,7	2,6	4,8	4,9	5,7	4,5	6,5	41	18	42	26
Moyenne des testcross	2,75	4,8	2,75	4,8	4,7	6,1	4,7	6,1	41	21	41	21
Ppds	2,3	1,7	2,3	1,7	2,0	1,8	2,0	1,8	-	-	-	-

O : sol acide ; T : sol acide corrigé ; %PRP : pourcentage relatif de pertes ; ppds : plus petite différence significative.

effets dépressifs sur le maïs que la toxicité aluminique.

Les hybrides testés présentent de moindres pertes de rendement (%PRP) à Nkolbisson (35 %) qu'à Ebolowa (40 %), attestant ainsi de leur meilleure adaptation à leur site de développement. La performance moyenne du testeur 87036 est meilleure que celle du testeur 88094 tant sur sol à toxicité aluminique que mangannique. La différence de performance entre les deux testeurs est plus grande à Nkolbisson où les testeurs présentent différents niveaux de tolérance aux sols acides, qu'à Ebolowa où les deux ont été pressentis tolérants. Ensuite, on note que les hybrides ayant le testeur 87036 comme parent, présentent des performances moyennes meilleures que la moyenne des testcrosses tant pour le paramètre rendement que pour la longueur de la racine séminale. Ces résultats tendent à suggérer que la performance des

testcrosses sur un type d'acidité du sol est étroitement liée au niveau de tolérance des testeurs à cette situation d'acidité et que la tolérance est contrôlée par un ou plusieurs gènes majeurs (Rhue *et al.*, 1978 ; Miranda *et al.*, 1984).

Sur sol acide à Nkolbisson, 10 hybrides ont des rendements supérieurs ou égaux à celui du témoin 87036 x 88094 (5,0 t/ha) ; 9 de ces hybrides proviennent des croisements des lignées endogames avec le testeur 87036. Sur sol corrigé, 9 hybrides ont présenté des rendements supérieurs ou égaux à celui du témoin (6,3 t/ha). Parmi ceux-ci, 8 hybrides se sont distingués par leurs performances élevées sur sol acide. Le meilleur de ces hybrides performants tant sur sol acide que sur sol corrigé est Cam inb gp₁ 17 x 87036 avec 7,2 t/ha et 8,3 t/ha respectivement.

Le pourcentage de perte relative de rendement due aux sols acides présenté

tableau 6 montre que 13 hybrides (22 %), ont des pertes relatives de rendement égales ou inférieures à celle du témoin. Parmi ces 12 hybrides, figurent 7 hybrides sur les 8 retenus plus haut pour leurs rendements supérieurs à celui du témoin tant sur sol acide que sur sol corrigé. Il s'agit de ATP-S4-25W x 87036, M131 x 87036, Cam inb gp₁17 x 87036, CMLCI-IDR-STR x 87036, Entrada 29 x 87036, Entrada 29 x 88094 et Entrada 3 x 87036. Ces hybrides sont considérés tolérants aux sols acides à toxicité mangannique.

Les résultats des mesures de l'élongation racinaire sur sol acide à toxicité mangannique à Nkolbisson sont également présentés au tableau 6. Ils montrent, comme sur sol acide à toxicité aluminique, que quelques hybrides réagissent en allongeant leurs racines séminales.

L'élongation de la racine séminale en présence du manganèse échangeable comme critère de sélection au stade juvé-

Tableau 6. Performances moyennes des lignées en croisement sur sol acide à toxicité manganique à Nkolbisson.

Table 6. Mean performances of the testcrosses on manganese toxic soil at Nkolbisson.

Lignées	O				T				%PRP			
	87036		88094		87036		88094		87036		88094	
	RDT tonne/ha	LRS cm	RDT tonne/ha	LRS cm	RDT tonne/ha	LRS cm	RDT tonne/ha	LRS cm	RDT	LRS	RDT	LRS
CML357	3,7	8,0	3,9	8,3	5,4	10,6	4,9	14,3	31	25	20	42
CML365	5,2	8,5	4,5	9,2	6,0	20,2	5,7	12,0	13	58	21	23
Entrada 29	5,0	9,1	5,4	9,5	6,3	14,1	6,4	14,1	21	35	16	33
Entrada 3	5,8	9,0	2,3	16,5	6,6	15,3	3,0	16,5	12	41	23	0
ATP-S4 -25W	6,3	5,0	3,2	10,1	7,6	13,6	6,1	11,9	17	63	48	15
M131	6,6	7,6	4,2	9,7	7,4	10,3	5,4	11,3	11	26	22	14
Lap5	5,4	7,1	1,9	12,5	6,2	10,0	3,2	14,8	13	29	41	52
Exp ₁ 24	1,8	5,4	2,4	5,0	4,1	12,5	4,8	12,7	56	57	50	61
Cam inb gp ₁ 17	7,2	9,5	3,5	12,3	8,3	15,	6,0	10,8	13	38	42	- 14
Exp ₁ 42	1,3	11,4	0,5	7,5	2,2	15,5	2,9	10,5	41	26	83	29
HLM1 9	4,5	7,5	2,1	8,2	5,6	16,0	3,2	21,0	20	53	34	61
1368	2,5	9,5	1,2	9,0	5,3	8,9	2,1	12,0	53	- 7	43	25
NCRE gp ₂ 8	3,6	9,6	0,9	7,5	5,7	9,8	3,9	13,9	37	2	77	46
90301	0,7	12,7	0,6	8,3	5,1	8,2	4,1	10,1	86	- 55	85	18
NCRE gp ₃ 59	0,6	9,0	4,1	9,2	1,9	7,0	5,3	16,1	68	- 29	23	43
CMLCI-HDR-STR	5,6	5,7	1,9	9,0	6,3	9,8	6,2	12,3	11	42	69	27
Exp ₁ 23	1,2	10,5	0,5	11,4	2,1	10,2	3,9	10,5	43	- 3	87	- 9
NCRE gp ₁ 107	4,7	12,6	1,7	6,2	8,1	13,0	2,5	14,4	42	3	32	57
ATP- S4-9W	5,4	7,21	2,0	8,2	7,9	16,3	4,7	14,9	32	56	57	45
Témoin			5,0	7,1			6,3	16,7			22	34
88094 x 87036												
Moyenne du testeur	4,1	8,7	2,5	9,3	5,7	12,4	4,4	13,4	28	30	43	31
Moyenne des testcross	3,3	9,0	3,3	9,0	5,1	12,9	5,1	12,9	35	30	35	30
Ppds	2,2	3,9	2,2	3,9	2,3	4,4	2,3	4,4	-	-	-	-

O : sol acide ; T : sol acide corrigé ; %PRP : pourcentage relatif de pertes ; ppds : plus petite différence significative.

nile de la plante, permet d'identifier 14 hybrides présentant des pourcentages de perte égaux ou inférieurs à celui du témoin. Parmi ces 14 hybrides, figurent 2 seulement des 7 retenus ci-dessus pour leur tolérance sur sol acide à toxicité manganique. Ce sont M131 x 87036 et Entrada 29 x 88094. La longueur de la racine séminale n'a donc permis d'identifier qu'un nombre très restreint (33 %) de génotypes hautement productifs sur les sols acides à toxicité manganique.

L'étude combinée sur les deux sites montre qu'en utilisant le critère rendement, les hybrides Cam inb gp 1 17 x 87036 et Entrada 29 x 87036 sont les seuls retenus pour leurs performances tant sur sol acide à toxicité aluminique que sur sol acide à toxicité manganique. Ces deux hybrides présentent, sur les deux types d'acidité du sol, de bons rendements tant sur sol acide que sur sol corrigé et ont

également présenté les moindres pertes de rendement dues à l'acidité des sols.

Ces résultats suggèrent que la sélection pour la tolérance aux sols acides est spécifique du type d'acidité, et également du site utilisé. Il en résulte que les mécanismes contrôlant la tolérance aux sols acides sont complexes et probablement différents pour les deux types d'acidité du sol.

Le *tableau 7* présente les carrés moyens issus de la partition orthogonale de la somme des carrés des écarts pour les paramètres rendement et longueur de la racine séminale en effets des lignées, testeurs et lignées x testeurs. Pour le paramètre rendement, les effets dus aux testeurs et aux interactions lignées x testeurs sont hautement significatifs ($P < 0,01$), tant sur sol acide que sur sol corrigé. Cela indique la présence de gènes à effets additifs et de gènes à effets non additifs

dans le contrôle de la tolérance à l'acidité des sols pour le paramètre rendement en grains. À Ebolowa, sur sol acide à toxicité aluminique, la contribution des gènes à effets non additifs est prépondérante (76,3 %) sur les gènes à effets additifs. Sur sol corrigé, les effets des gènes additifs (49,5 %) et non additifs (50,5 %) sont globalement semblables.

À Nkolbisson, sur sol acide à toxicité manganique, les effets des gènes additifs (68,7 %) sont prépondérants sur ceux des gènes à effets non additifs (31,2 %). Cette supériorité est valable sur sol corrigé (65 % contre 35 %). Des résultats similaires ont été rapportés (Magnavaca *et al.*, 1987 ; Pandey *et al.*, 1994).

Ainsi, pour le paramètre rendement, la tolérance à la toxicité aluminique dépendrait plus des gènes à effets non additifs. Sur sols acides à toxicité manganique, la

Tableau 7. Carrés moyens issus de la partition orthogonale de la somme des carrés des écarts pour les caractères rendement et longueur de la racine séminale (LRS).

Table 7. Mean squares from the orthogonal partition of the sum of square testcrosses for grain yield and length of seminal root (LRS).

Sources de variation	ddl	Rendements				LRS			
		Ebolowa		Nkolbisson		Ebolowa		Nkolbisson	
		O	T	O	T	O	T	O	T
Croisements	37	3,32**	4,02**	11,25**	9,76**	44,50**	19,30**	17,20**	29,00**
Lignées	18	1,46 NS	3,30**	12,33**	10,62**	57,90**	10,97**	17,11**	25,70**
Testeurs	1	2,75**	14,17**	64,13**	43,69**	23,85**	7,61**	0,82 NS	8,47 NS
Lignées x testeurs	18	5,21**	4,17**	7,22**	7,01**	32,20**	28,29**	18,22**	33,50**
Erreur	74	2,05	1,11	1,98	2,09	2,10	1,80	9,70	12,50
Contributions dans la somme des carrés (%)									
Lignées		21,41	39,95	53,34	52,95	63,31	27,60	48,36	43,12
Testeurs		2,23	9,52	15,40	12,09	1,44	1,06	0,12	0,78
Lignées x testeurs		76,30	50,51	31,25	34,90	35,25	71,29	51,50	56,08

** : significatif à $p < 0,01$; * : significatif à $p < 0,05$; O : sol acide ; T : sol acide corrigé.

tolérance serait mieux contrôlée par des gènes à effets additifs.

Pour le paramètre longueur de la racine séminale, les données figurant au *tableau 7* montrent qu'en dehors de la contribution des testeurs, non significative à Nkolbisson, les effets des lignées et de l'interaction lignées x testeurs sont hautement significatifs tant sur sol acide que sur sol corrigé sur les deux types de sol acide. À Ebolowa, sur sol acide, la contribution des gènes à effets additifs (64,75 %) est prépondérante sur celle des gènes à effets non additifs (35,25 %). À Nkolbisson, sur sol acide à toxicité manganique, les deux types de mode d'action des gènes sont semblables.

Les résultats obtenus sur les effets des gènes suggèrent donc la formation de pools hétérotiques comme préalable à la création d'hybrides de maïs tolérants aux sols acides.

Les aptitudes générales à la combinaison (AGC) présentées au *tableau 8* montrent que 10 parents ont eu des AGC positives, aussi bien sur sol acide à toxicité aluminique que sur sol corrigé. Six de ces lignées avaient été pressenties comme tolérantes et quatre comme modérément tolérantes. Les meilleures lignées sont : M131, Cam inbgp₁17, Entrada 29, CML 365, ATP-S4-25-W, 87036, CML 357, CMLCI-IDR-STR et ATP-S4-9-W. Sur sol acide à toxicité manganique, huit ont eu des AGC positives aussi bien sur sol acide que sur sol corrigé, quatre seulement étaient pressenties tolérantes, deux modérément tolérantes et deux susceptibles à la toxicité manganique. Les meilleurs géniteurs pour ce

Tableau 8. Aptitudes générales à la combinaison des lignées pour le caractère rendement sur sol acide et sol acide corrigé à Ebolowa et Nkolbisson.

Table 8. General combining ability on acid and corrected acid soil for grain yield at Ebolowa and Nkolbisson.

Lignées	AGC			
	Ebolowa		Nkolbisson	
	O	T	O	T
CML357	0,62	0,17	0,04	0,26
CML365	1,67	0,82	-0,16	1,16
Entrada 29	1,72	1,27	-0,16	0,76
Entrada 3	-0,13	-0,13	-0,21	0,81
ATP-S4 -25W	1,57	1,87	1,19	1,26
M131	2,27	1,37	0,41	0,29
Lap5	0,47	-0,28	0,84	0,76
Exp ₁ 24	-1,08	-0,48	0,19	0,06
Cam inb gp ₁ 17	2,17	2,22	0,14	0,46
Exp ₁ 42	-2,23	-2,28	-0,31	-0,74
HLM1 9	0,12	-0,63	-0,11	-0,69
1368	-1,33	-1,23	0,09	-0,59
NCRE gp ₂ 8	0,93	-0,43	-0,41	-0,24
90301	-2,28	-1,43	0,44	-0,74
NCRE gp ₃ 59	-0,83	-1,53	0,39	-0,54
CMLCI-IDR-STR	0,57	1,27	0,19	0,11
Exp ₁ 23	-2,63	-2,03	-0,81	-0,34
NCRE gp ₁ 107	0,02	0,37	-0,16	0,16
ATP- S4-9W	0,52	1,17	-0,16	-1,54
87036	0,75	0,62	0,15	0,35
88094	-0,75	-0,62	-0,15	-0,35
E.S des lignées	0,55	0,58	0,58	0,42
E.S des testeurs	0,17	0,17	0,17	0,11

E.S : erreur standard ; AGC : aptitude générale à la combinaison ; O : sol acide ; T : sol acide corrigé.

Tableau 9. Quinze meilleures aptitudes spécifiques à la combinaison pour le rendement sur sol acide à Ebolowa et Nkolbisson.

Table 9. Fifteen best specific combining abilities on acid soil for grain yield at Ebolowa and Nkolbisson.

Ebolowa			Nkolbisson		
Génotypes	ASC	Rdt t/ha	Génotypes	ASC	Rdt t/ha
88094 x 90301	1,15	4,1	88094 x NCRE gp ₃ 59	2,5	4,1
87036 x Entrada 29	0,85	3,5	88094 x Entrada 29	1,2	5,4
88094 x Cam inbgp ₁ 17	0,75	3,4	87036 x Cam inbgp ₁ 17	1,1	7,2
87036 x Exp ₁ 24	0,70	3,7	87036 x CMLCI-IDR-STR	1,0	5,6
87036 x Exp ₁ 42	0,60	3,1	88094 x Exp ₁ 24	1,0	2,4
87036 x NCRE gp ₂ 8	0,60	3,0	87036 x Lap5	1,0	5,4
88094 x ATP-S4-25W	0,40	4,1	87036 x ATP-S4-9w	0,9	5,4
88094 x Exp ₁ 23	0,40	2,1	88094 x CML 357	0,8	3,9
88094 x Entrada 3	0,30	2,6	87036 x ATP-S4-25w	0,8	6,3
87036 x CML 365	0,25	2,9	88094 x 90301	0,8	0,6
87036 x Lap5	0,25	3,6	87036 x NCRE gp ₁ 107	0,7	4,7
87036 x NCRE gp ₁ 107	0,25	2,3	87036 x NCRE gp ₂ 8	0,6	3,6
87036 x M131	0,20	2,6	87036 x M131	0,5	6,6
88094 x HLM1 9	0,10	2,5	87036 x HLM1 9	0,4	4,5
88094 x 1368	0,10	2,7	88094 x CML 365	0,4	4,5

ASC: aptitude spécifique à la combinaison.

type de sol sont : ATP-S4-25-W, Lap5, M131, CMLCI-IDR-STR, Cam inbgp₁17 et 87036. Les meilleurs géniteurs pour les deux types d'acidité de sol sont : ATP-S4-25-W, M131, Cam inbgp₁17, CMLCI-IDR-STR, 87036, CML 357. Ces lignées ont eu les AGC positives sur sol acide à toxicité aluminique, sur sol acide à toxicité manganique et sur sol acide corrigé.

Les 15 meilleurs hybrides retenus pour leurs aptitudes spécifiques à la combinaison (ASC) sur sol acide à Ebolowa et à Nkolbisson sont présentés *tableau 9*.

À Ebolowa, l'hybride 88094 x 90301 qui avait le meilleur rendement sur sol acide a également présenté la meilleure aptitude spécifique à la combinaison. Il peut donc servir de base de classification des lignées en pools hétérotiques. Ainsi, les lignées 88094 et 90301 sont situées dans des pools opposés. La lignée 87036 déjà opposée à la lignée 88094 se situerait dans le même pool que la lignée 90301.

En tenant donc compte des ASC des autres hybrides, le pool 1 sur sol acide à toxicité aluminique serait composé des lignées 88094, Exp₁24, Entrada 29, Exp₁42, NCRE gp₂8, CML 365, NCRE gp₁107 et M131. Ce pool 1 contient 88094, Entrada 29, CML 365 et Lap5 connus comme appartenant au groupe Tuxpeño. Les autres lignées de ce groupe s'apparenteraient donc

au groupe Tuxpeño. Le pool 2 sur sol acide à toxicité aluminique serait composé des lignées 90301, 87036, cam inbgp₁17, ATP-S4-25w, Exp₁23, Entrada 3, Lap5, HLM19 et 1368. En dehors de la lignée 1368 extraite de la population 21 du CIMMYT qui serait classée Tuxpeño, ce groupe contient les lignées 87036 et Entrada 3 connues comme appartenant au groupe Eto. Les autres lignées de ce groupe s'apparenteraient au groupe hétérotique Eto. Ces résultats suggèrent que sur sol acide à toxicité aluminique, les lignées tolérantes pourraient être classées en deux pools hétérotiques identifiables aux groupes Tuxpeño et Eto du CIMMYT.

À Nkolbisson, sur sol acide à toxicité manganique, le croisement 88094 x NCRE gp₃59 a montré la meilleure ASC avec un bon rendement sur sol acide. La lignée NCREgp₃59 appartiendrait donc au pool opposé à celui de 88094, donc au groupe Eto. Il résulte de ce qui précède que le pool 1 sur sol acide à toxicité manganique serait composé des lignées 88094, Cam inbgp₁17, CMLCI-IDR-STR, Lap5, ATP-S4-9w, ATP-S4-25w, NCRE gp₁107, NCRE gp₂8, M131 et HLM19. Ce pool contient les lignées 88094, CMLCI-IDR-STR, Lap5 connues comme appartenant au groupe Tuxpeño. Cependant, on remarque la présence des lignées

Cam inbgp₁17, HLM1 9 et ATP-S4-25w classées plus haut comme appartenant au groupe Eto. Le pool 2 sur sol acide à toxicité manganique se composerait des lignées NCRE gp₃59, 87036, Entrada 29, Exp₁24, CML 357, 90301 et CML 365. Dans ce groupe, les lignées 87036, CML 357, 90301 sont connues comme appartenant au groupe Eto. Cependant, on y retrouve aussi les lignées Entrada 29 et CML 365 connues comme appartenant au groupe Tuxpeño. En plus, les lignées CML 365 et CML 357 classées par le CIMMYT dans des pools hétérotiques différents, appartiennent ici au même groupe. Ce résultat suggérerait que sur sol acide à toxicité manganique, les pools hétérotiques ne s'identifient pas aux deux grands ensembles connus, à savoir Tuxpeño et Eto. Sur sol acide à toxicité manganique, les pools devraient être développés à partir des évaluations des lignées endogames et des *topcrosses* sur sol acide manganique sans tenir compte de leur origine hétérotique.

Conclusion

Les hybrides évalués dans cette étude ont montré une grande variabilité pour la tolérance aux deux types d'acidité du sol. Les paramètres rendement et longueur de la racine séminale ont été identifiés comme critères de sélection dans le criblage des lignées pour la tolérance aux sols acides à toxicité aluminique. Cependant, la longueur de la racine séminale a été moins efficace comme critère de sélection sur sol acide à toxicité manganique.

L'étude a permis de sélectionner un nombre restreint d'hybrides performants sur les deux types de sols. Il a également été possible d'obtenir des géniteurs tolérants aux deux types d'acidité des sols. Il en découle cependant que le criblage des lignées endogames à utiliser en amélioration des plantes devrait se faire sur chaque type d'acidité de sol.

Sur sol acide à toxicité aluminique, la constitution de pools hétérotiques peut se faire en suivant les deux grands groupes connus dans les tropiques : Tuxpeño et Eto. Cette classification n'est probablement pas valable sur sol acide à toxicité manganique. Les lignées criblées sur ce type de sol devraient être recombinées en tenant compte des ASC et des rendements spécifiques de chaque F₁ obtenus sur sol acide à toxicité manganique. ■

Remerciements

Ce travail a été financé par l'Union européenne à travers le projet ERBIC IC18-CT 96-0063.

Nous remercions le Cirad pour les analyses de sol réalisées à Montpellier.

Références

- Bennet RJ, Breen CM, Fey MV. Aluminium toxicity and induced nutrients disorders involving the uptake and transport of P, K, Ca and Mg in Zea mays L. *S Afr J Plant Soil* 1986 ; 3 : 11-7.
- Borrero JC, Pandey S, Ceballos H, Magnavaca R, Bahia Filho AFC. Genetic variances for tolerance to soil acidity in a tropical maize population. *Maydica* 1995 ; 40 : 283-8.
- Collet L, Horst WJ. Characterisation of maize cultivars in their adaptation to acid soils in the single plant level. In : Horst WJ, *et al.*, eds. *Plant nutrition-Food security and sustainability of agro-ecosystems*. Dordrecht (The Netherlands) : Kluwer Academic Publishers, 2001.
- Duque-Vargas J, Pandey S, Granados G, Ceballos H, Knapp E. Inheritance of tolerance to soil acidity in tropical maize. *Crop Sci* 1994 ; 34 : 50-4.
- Eswaran H, Reich P, Beigroth F. In : Moniz AC, *et al.*, eds. *Plant soil interaction at low pH*. Campinas (Brésil) : Brazilian soil science society, 1997.
- Granados G, Pandey S, Ceballos H. Response to selection for tolerance to acid soils in a tropical maize population. *Crop Sci* 1993 ; 33 : 936-40.
- Hallauer AR, Russel WA, Lamkey KR. Corn breeding. In : Sprague GF, Audley JW, eds. *Corn and corn improvement*. 3rd edition. Agronomy monograph n° 18. Madison (Wisconsin) : ASA-CSSA.SSSA, 1988.
- Howeler RH, Cadavid LF. Screening of rice cultivar for tolerance to Al. Toxicity in nutrient solutions as compared with a field screening method. *Agron J* 1976 ; 68 : 551-5.
- Kempthorne O. *An introduction to genetic statistics*. New-York : John Wiley and sons, Inc, 1957.
- Llugany M, Poschenrieder C, Barcelo J. Monitoring of aluminium induced inhibition of root elongation in four maize cultivars differing in tolerance to aluminium and proton toxicity. *Physiol Plant* 1995 ; 93 : 265-71.
- Magnavaca R, Gardner CO, Clark RB. Inheritance of aluminium tolerance in maize. In : Gabelman HW, Loughman BC, eds. *Genetic aspect of plant mineral nutrition*. Dordrecht (The Netherlands) : Martinus Nijhoff Publisher, 1987.
- Miranda LT, Furlani PR, Miranda LEC, Sawazaki E. Genetic of environmental resistance and super genes : Latent aluminium tolerance. *Maize Genet Coop News* 1984 ; 58 : 46-8.
- Orsini L, Rémy JC. Utilisation du chlorure de cobaltihexamine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. *Sci Sol* 1976 ; 4 : 269-75.
- Pandey S, Gardner CO. Recurrent selection for population, variety and hybrid improvement in tropical maize. *Adv Agron* 1992 ; 48 : 1-87.
- Pandey S, Ceballos H, Magnavaca R, Bsjio-Go AFC, Duque-Vargas JPJ, Vinasco LE. Genetics of tolerance to soil acidity in tropical maize. *Crop Sci* 1994 ; 31 : 1511-4.
- Rhue RD, Grogan CO, Stockmeyer EW, Everett HL. Genetic control of aluminium tolerance in corn. *Crop Sci* 1978 ; 18 : 1063-7.
- Salazar FS, Pandey S, Narro L, *et al.* Diallel analysis of acid soil tolerant and intolerant tropical maize populations. *Crop Sci* 1997 ; 37 : 1457-62.
- Thé C, Ayuk GA, Mongnong B. Heterotic groups in lowland tropical maize. *Agronomy abstract (ASA - CSSA. SSSA)* 1991 ; 118.
- Vasal SK, Srinivasan G, Han GC, Gonzalez F. Heterotic patterns of eighty eight white subtropical CIMMYT maize lines. *Maydica* 1992 ; 37 : 319-27.
- Vasal SK, Srinivasan G, Pandey S, Cordova HS, Han GC, Gonzalez F. Heterotic pattern of ninety two tropical CIMMYT maize lines. *Maydica* 1992 ; 37 : 259-70.