

BURKINA FASO

Unité-Progrès-Justice

**MINISTERE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE, SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE
BOBO DIOULASSO (UPB)**

**CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET
TECHNOLOGIQUE (CNRST)**

**INSTITUT DU DEVELOPPEMENT
RURAL (IDR)**

**INSTITUT DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE RECHERCHES AGRICOLES
(INERA)**

**STATION DE RECHERCHES
AGRICOLES DE FARAKO- BA**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté en vue de l'obtention du

DIPLOME D'INGENEUR DU DEVELOPPEMENT RURAL

Option : **AGRONOMIE**

THEME :

**VARIABILITE GENETIQUE DE LA TOLERANCE DU MAIS A L'ACIDITE DES
SOLS TROPICAUX**

Directeur de Mémoire : Dr BACYE Bernard

Maître de stage : Dr KAMBIRE. S. Hyacinthe

Octobre 2001

ABESSOLO Mireille Benoîte

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	I
DEDICACES	V
REMERCIEMENTS.....	VI
LISTE DE SIGLES ET ABREVIATIONS	VII
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES.....	IX
RESUME	XI
ABSTRACT.....	XII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1. DEFINITION	3
1.2 CAUSES DE L'ACIDIFICATION DES SOLS	4
1.2.1 Lessivage des sols	4
1.2.2 Engrais	4
1.2.3 Mise en culture des sols	5
1.3 CONSEQUENCES AGRONOMIQUES DE L'ACIDIFICATION DES SOLS.....	5
1.3.1 Incidences de l'acidité des sols sur les propriétés physique	5
1.3.2 Incidence sur les propriétés chimiques du sol	6
1.3.3 Effets de l'acidité sur les propriétés biologiques des sols.....	9
1.3.4 Effets de l'acidité sur les cultures	10
1.4. METHODE D'EVALUATION DE L'ACIDITE DES SOLS.....	12
1.4.1 Mesure du pH.....	12
1.4.2 Evaluation de la gamiture cationique du complexe adsorbant	13
1.4.3 Dosage de l'aluminium échangeable	14
1.4.4 Rendements des cultures et l'aspect des récoltes	14.
1.5. CORRECTION DE L'ACIDITE DES SOLS	15

1.6 TOLERANCE DU MAÏS AUX SOLS ACIDES.....	16
1.7 MECANISME PHYSIOLOGIQUE DE TOLERANCE EN SOL ACIDE	17

CHAPITRE 2 PRESENTATION DU SITE D'ETUDE ET METHODE

D'ETUDE.....	18
2.1 SITE D'ETUDE.....	18
2.1.1 Situation géographique.....	18
2.1.2 Climat.....	18
2.1.3 Végétation.....	20
2.1.4 Sols.....	20
2.2 MATERIEL ET METHODE.....	21
2.2.1 Essai préliminaire d'incubation des sols.....	21
2.2.1.1 Matériel.....	21
2.2.1.1.1 Sol.....	21
2.2.1.1.2 Traitements.....	22
2.2.1.2 Méthode d'étude.....	22
2.2.1.2.1 Mesure de la capacité maximale de rétention.....	23
2.2.1.2.2 Mise en pot.....	23
2.2.1.2.3 pH.....	23
2.2.1.3 Résultats et discussion de l'essai préliminaire.....	24
2.2.2 Essai d'évaluation des lignées.....	26
2.2.2.1 Matériel.....	26
2.2.2.1.1 Sol.....	26
2.2.2.1.2 Végétal.....	26
2.2.2.1.3 Fertilisants.....	28
2.2.2.2 Méthode d'étude.....	28
2.2.2.2.1 Dispositif expérimental.....	28
2.2.2.2.2 Mise en place de l'essai.....	29
2.2.2.2.3 Semis.....	29
2.2.2.2.4 Dose d'arrosage.....	29
2.2.2.2.5 Mesures.....	29
2.2.2.2.6 Le traitement statistique des données.....	31
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	32
3.1 RESULTATS	32
3.1.1 Comportement des lignées Maka	32
3.1.1.1 Effet du « type de sol » sur les lignées Maka.....	33
3.1.1.2 Variabilité des caractères en fonction des lignées : effet lignée	35

3.1.1.3 Interaction sol-lignée : variation de l'effet du sol en fonction des lignées.....	39
.....	
3.1.2 Le comportement des lignées QPL	47
3.1.2.1 Effet du chaulage sur les lignées QPL.....	48
3.1.2.2 Variabilité des caractères en fonction des lignées : effet lignée	51
3.1.2.3 Interaction sol-lignée : variabilité des effets du sol en fonction de la lignée	
.....	54
3.1.3 Criblage des lignées pour la tolérance à l'acidité	59
3.1.3.1 Choix des critères de sélection	59
3.1.3.2 Définition des classes de comportement	62
3.1.3.3 Regroupement des lignées Maka	62
3.1.3.4 Regroupement des lignées QPL	64
3.2 DISCUSSION	66
3.2.1 Effets du chaulage sur les différents caractères des lignées.....	66
3.2.2 Variabilité des caractères des lignées.....	67
3.2.3 Effet de l'interaction sol- lignée sur les différents caractères.....	68
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	69
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	71
ANNEXE	76

DEDICACES

ooooo

- A celle qui a toujours été mon père et ma mère, **Mme BOUDOUGHA Cécile,**

Merci pour tout ce que tu as fait et que tu continues de faire pour moi en particulier et pour tous tes enfants en général,

- A ma défunte grande sœur **LIKOUMBI Huguette Rachel.**
- A mes frères, sœurs **Serges, Brice, Anicet, Clovis, Brigitte, Ghislaine, Patricia, Pulchérie, Pamela.**
- A mes neveux et nièces **Joël, Alcide, Yohanne, Kinou, Raïssa, Jessyca, Ashley, Johannys, Anna.**
- A mon fiancé **EDOU AFFANE Silvère.**
- A mes deux petites belles sœurs **Ariane et Stéphanie.**

Ces dernières lignes, je voudrais les réserver à mon fils bien aimé **AFFANE EDOU TERENCE** qui n'a jamais cessé de prendre de mes nouvelles et de m'adresser plein de bisous. Tu me manques tant !



REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail à l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles a été rendu possible grâce à la contribution de plusieurs personnes. Qu'il me soit permis en ces quelques lignes de leur témoigner ma profonde reconnaissance et leur adresser mes vifs remerciements.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à :

- **Dr TRAORE N. Seydou.** Délégué Régional du CRREA de l'Ouest qui a bien voulu accepter que la station agricole de Farako-Bâ me serve de cadre pour la réalisation de cette étude.
- **Mr BADO B. Vincent.** Chef du Programme GRN/SP pour m'avoir accueilli au sein de son Programme.
- **Dr BACYE Bernard.** Mon directeur de Mémoire qui malgré ses nombreuses occupations a bien voulu diriger ce travail. Ses conseils et ses suggestions nous ont été d'un apport considérable.
- **Dr KAMBIRE S. Hyacinthe,** initiateur de cette étude pour l'assistance technique et matérielle qu'il m' a accordée lors de l'exécution de mes tâches. Il a été pour moi un professeur patient. En plus, Il m'a fait bénéficier de son expérience en matière de traitement informatique des données.
- **Dr SANOU Jacob** qui, tout en mettant à ma disposition le matériel végétal, m'a fait bénéficier de son expérience en matière de sélection et prodiguer des conseils inestimables sur le terrain. Il m'a également permis de mettre à jour mon document.
- **Dr TRAORE Oula** et **Mr TRAORE Karim** qui m'ont accordé une considération particulière et ont été d'une contribution forte par leurs suggestions. Leur sympathie

et leur esprit de collaboration dans le travail m'ont permis une intégration facile au sein du Programme GRN/SP.

- **Dr OUEDRAOGO Mahama** et **Dr DICKO Idrissa**, respectivement à l'OUA-SAFGRAD et à HUNGER PROJET, qui m'ont souvent prodigué des conseils, des encouragements et ont mis à ma disposition des adresses afin de trouver des documents nécessaires à la réalisation de ce travail.
- Tous les chercheurs des Programmes GRN/SP Ouest et Coton, particulièrement le **Dr DABIRE Roch** et **Mr VOGNAN Gaspard** pour leur disponibilité, leurs suggestions et leur aide quant à l'utilisation du matériel informatique.
- A **M^{me} SANOU** Secrétaire au programme Coton et à **Mlle PARE NADO Marie** Secrétaire au programme Céréales Traditionnelles pour les multiples services rendus.
- Aux techniciens du Programme GRN/SP, **MM. SANKARA Constantin, YAMEOGO Léandre, OUATTARA Amoro**.
- Au projet Gestion de la Pêche dans la Sud-Ouest (GPSO), particulièrement à **Mr ELANMANE Yvon** pour les nombreux services rendus.
- tout le corps professoral de l'IDR dont les efforts inlassables et soutenus et l'enseignement dispensé au cours de ces trois années m'ont permis de recevoir une formation conséquente.
- tous mes compatriotes, dont la contribution et l'ambiance créées ont été d'un grand réconfort, particulièrement **bébé Danny** qui a su entretenir en moi la joie d'être maman.
- **Mlle ZONGO Clarisse, Mr MAKELE Emmanuel, Dr EKOUE Gilles, Dr FONGANG Clément, Mr DIALLO** qui ont été pour moi au Burkina Faso des amis attentifs.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ADN	Acide Désoxyribo Nucléique
Al	Aluminium
BUNASOLS	Bureau National des Sols
C.M.R	Capacité maximale de rétention
Ca	Calcium
CRREA	Centre Régional de Recherches Environnementales et Agricoles
F.A.O	Food and Agriculture Organization of United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
GRN/SP	Programme de recherches sur la Gestion des Ressources Naturelles et les Systèmes de Production
I.R.A.T	Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et de Cultures vivrières
JAS	Jours après semis
Lsd	Least significant difference
Mn	Manganèse
MO	Matière organique
Na	Sodium
QPL	Quality Protein Line
RPF	Référentiel Pédologique Français
SSSA	Soil Science Society of America

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX	PAGE
<u>Tableau I</u> : Toxicité aluminique chez quelques plantes.....	7
<u>Tableau II</u> : Qualificatifs de l'acidité du sol selon les systèmes américain (SSSA, 1987) et français (RPF, 1992).....	12
<u>Tableau III</u> : Caractéristiques chimiques d'un échantillon de sol.....	22
<u>Tableau IV</u> : Effet des différents traitements sur le pH_{eau} et le pH_{KCl} du sol au cours de l'incubation.....	24
<u>Tableau V</u> : Caractéristiques des MAKAs.....	27
<u>Tableau VI</u> : Résultats de l'analyse de variance pour les lignées Maka.....	33
<u>Tableau VII</u> : Comparaison des moyennes des différents caractères en fonction du type de sol.....	34
<u>Tableau VIII</u> : Effet moyen du chaulage sur les caractères agromorphologiques des lignées MAKAs.....	35
<u>Tableau IX</u> : Performances des lignées en fonction des paramètres liés à la partie aérienne des plantes.....	37
<u>Tableau X</u> : Performances des lignées en fonction des paramètres liés à la partie aérienne des plantes.....	38
<u>Tableau XI</u> : Effets des traitements sur la biomasse aérienne des lignées.....	41
<u>Tableau XII</u> : Effets des traitements sur la hauteur des plants des lignées.....	42
<u>Tableau XIII</u> : Effets des traitements sur le nombre de feuilles /plant.....	43
<u>Tableau XIV</u> : Effets des traitements sur la surface foliaire /plant.....	44
<u>Tableau XV</u> : Effets des traitements sur la biomasse racinaire des lignées.....	45
<u>Tableau XVI</u> : Effets des traitements sur le volume racinaire des lignées.....	46
<u>Tableau XVII</u> : Résultats de l'analyse de variance pour les lignées QPL.....	48
<u>Tableau XVIII</u> : Comparaison des moyennes des différents caractères en fonction du type de sol.....	49
<u>Tableau XIX</u> : Effet moyen du chaulage sur les caractères agromorphologiques des lignées QPL.....	50
<u>Tableau XX</u> : Performance des lignées en fonction des paramètres liés à la partie aérienne et à la partie souterraine des plantes.....	52
<u>Tableau XXI</u> : Performance des lignées en fonction des paramètres liés à la partie souterraine des plantes.....	53

<u>Tableau XXII</u> : Effets des traitements sur la biomasse aérienne des lignées.....	54
<u>Tableau XXIII</u> : Effets des traitements sur la hauteur des plantes des lignées.....	55
<u>Tableau XXIV</u> : Effets des traitements sur le nombre de feuilles des lignées.....	56
<u>Tableau XXV</u> : Effets des traitements sur la surface foliaire des lignées.....	57
<u>Tableau XXVI</u> : Effets des traitements sur la biomasse racinaire.....	58
<u>Tableau XXVII</u> : Effets des traitements sur la volume racinaire.....	59
<u>Tableau XXVIII</u> : Corrélation de la biomasse aérienne avec les autres variables en sol chaulé.....	59
<u>Tableau XXIX</u> : Corrélation de la biomasse aérienne avec les autres variables en sol acide.....	60
<u>Tableau XXX</u> : Regroupement des lignées Maka.....	61
<u>Tableau XXXI</u> : Regroupement des lignées QPL.....	63.
<u>Tableau XXXI</u> Liste des lignées Maka tolérantes et sensibles.....	65
<u>Tableau XXXI</u> Liste des lignées QPL tolérantes et sensibles.....	65

FIGURES

PAGE

<u>Figure 1</u> : Répartition mensuelle de la pluviométrie de Farako-Bâ (2000).....	19
<u>Figure 2</u> : Evolution de l'humidité relative journalière de l'air à Farako-Bâ (mars 2001).....	19
<u>Figure 3</u> : Evolution de la température journalière du mois de mars 2001 à Faraka-Bâ.....	20

RESUME

L'acidité des sols est une importante cause de la faible fertilité des sols en Afrique de l'Ouest et particulièrement au Burkina Faso.

Un essai d'évaluation de 100 lignées de maïs (50 lignées Maka et 50 lignées QPL) a été réalisé afin de proposer des lignées tolérantes aux conditions d'acidité des sols.

Les travaux ont été conduits à la station expérimentale de Farako-Bâ. Sur les 100 lignées évaluées, l'analyse des données a finalement concerné 32 lignées Maka et 13 lignées QPL pour lesquelles les données sont complètes.

On suppose que les lignées tolérantes aux sols acides sont celles ayant présenté en sol acide une biomasse aérienne supérieure ou égale à celle en sol amendé par de la chaux. Il résulte de cette étude que dix sept lignées MAKKA et huit lignées QPL sont tolérantes aux sols acides.

Mots clés : Sols tropicaux acides, maïs, Burkina Faso

ABSTRACT

Soil acidity is the major constraint to crop production in the West Africa and singularly in Burkina Faso.

An evaluation trial of 100 maize lines (50 Maka lines and 50 QPL lines) was carried out at the experiment research centre of Farako-Bâ to determine the tolerant lines in soil acid conditions.

From the 100 lines evolved by the experiment, the analysis concerned only 32 Maka lines and 13 QPL lines for which data were complete.

We supposed that the tolerant lines are the ones who biomass in acid soil are greater than or equals to the biomass in soil lime amended. The results of our study show that seventeen Maka lines and eight QPL lines are tolerant to acid soils.

Key words : acid tropical soils, maize, Burkina Faso

INTRODUCTION

Au Burkina Faso, le maïs est l'une des espèces cultivées dans toutes les zones agro-écologiques Ouest du pays. Il occupe une place de choix dans les principaux systèmes de cultures et possède le potentiel nécessaire à l'intensification dans le cadre d'une politique d'autosuffisance alimentaire (Sanou, 1996). Il représente 10 % des surfaces céréalières totales du pays ; la production de la campagne 1999-2000 est de 377 758 tonnes pour une superficie de 271 405 hectares (Afrique Agriculture, 2000)

Malheureusement, comme pour la plupart des cultures au Burkina Faso, les rendements restent faibles. Plusieurs causes sont citées parmi lesquelles, une pluviométrie irrégulière, la faible fertilité des sols, un encadrement inadéquat des producteurs, une faible utilisation des intrants, la vétusté des moyens de production, les actions néfastes des parasites, les variétés non adaptées.

L'acidité des sols demeure une importante cause de l'infertilité de la plupart des sols (Granados, 1993). En effet Pedro (1985) montre que les sols acides occupent près de 40% des terres émergées du globe. Environ 43 % des terres acides sont des sols tropicaux (Pandey *et al.*, 1994). Ces sols représentent la majeure partie des terres cultivables dans le monde. De même, on estime à près de 20 millions d'hectares les surfaces cultivées en maïs sur sols acides (Uexkull et Mutttert, 1995). Les contraintes de ces sols sont multiples : toxicité de certaines formes ioniques libres de l'aluminium et du manganèse, déficiences minérales etc.

Parmi les diverses causes entraînant l'acidité des sols, on peut citer, la roche mère, l'exudation d'acides organiques par les racines des plantes, le lessivage des sols, l'emploi d'engrais acidifiants et les dépôts atmosphériques (Tessier, 2001).

L'acidification est la tendance du complexe à se charger de quantités plus importantes d'ions H^+ au détriment de cations alcalins et alcalino-terreux. Les travaux de Segalen (1976) ont montré que les mécanismes de fixation et d'échange de cations étaient

généralement influencés par le pH du sol. Toutefois, Piéri (1989), souligne que l'évaluation de l'activité de l'ion H^+ en solution, n'est pas directement utile pour prévoir la réaction des cultures puisqu'elles sont toujours tolérantes à cet ion. Par contre, elles sont sensibles à la pauvreté en bases échangeables (Ca^{2+} Mg^{2+} K^+) et à la présence d'ions toxiques en milieu acide (Mn^{2+} Al^{3+}).

Comme l'acidification des sols cultivés intervient à un rythme d'autant plus rapide que la culture est continue et que la restitution des éléments nutritifs exportés est insuffisante ou quasi inexistante, le problème de la décalcification se pose justifiant ainsi les apports périodiques des amendements calcaires et magnésiens. De plus cette technique onéreuse est pour le moment peu pratiquée dans les systèmes de culture au Burkina Faso. Une alternative au problème réside dans la recherche de variétés tolérantes aux conditions d' milieu acide. En effet, jusqu'à présent ce critère n'a jamais été pris en compte dans le processus de sélection des variétés de maïs proposées à la vulgarisation.

La présente étude a pour objectif d'identifier des lignées capables de supporter les conditions d'acidité.

Le mémoire comporte trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique, le second présente succinctement le milieu d'étude et l'approche méthodologique, et enfin, le troisième chapitre présente les résultats et discussions.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. DEFINITION

Soltner (1976) définit l'acidité d'un sol comme étant la mesure de la quantité d'ions H^+ libres dans la solution du sol. Elle représente la réaction de la solution du sol (acidité active du sol ou acidité actuelle, ou réelle) qui indique la concentration en ions H^+ actuellement dissociée dans la solution du sol. L'acidité d'un sol concerne sa solution mais aussi son complexe. Les ions H^+ libres de la solution sont en équilibre avec les ions H^+ fixés sur le complexe absorbant. Ces ions H^+ fixés, représentent l'acidité potentielle du sol ou acidité totale ou de réserve ou de titrage.

Du fait de l'équilibre qu'il y a entre les ions H^+ fixés sur le complexe et les ions H^+ libres, on distingue deux notions importantes de pH : pH_{eau} , pH_{KCl} .

Le pH_{eau} renseigne de manière approximative sur l'acidité actuelle du sol alors que le pH_{KCl} est un moyen efficace pour évaluer l'acidité potentielle. Le pH_{KCl} permet également d'évaluer les risques de présence d'aluminium échangeable sur le complexe absorbant du sol.

En définitive, le pH synthétise un ensemble de propriétés du complexe absorbant du sol où le calcium et le magnésium jouent un grand rôle.

1.2 CAUSES DE L'ACIDIFICATION DES SOLS.

Selon Piéri (1976), l'acidification des sols cultivés est due principalement à trois causes : le lessivage des sols, l'action décalcifiante de certains engrais, la mise en culture et l'insuffisance des restitutions des exportations.

1.2.1 Lessivage des sols

Le lessivage des sols est l'une des causes principales de l'acidification des sols. Ce lessivage dû à un bilan hydrique saisonnier excédentaire, se traduit par un appauvrissement en calcium, magnésium, potassium et azote (IRAT, 1973). Le drainage accru en sol dénudé ou faiblement couvert favorise le phénomène (Djondo, 1995). Les eaux de pluie contenant de petites quantités de gaz carbonique sont capables de dissoudre le calcaire existant dans le sol. Le calcium est alors entraîné en profondeur sous forme de bicarbonate de calcium (Soltner, 1976).

1.2.2 Engrais

D'une manière générale, divers auteurs (Poulain, 1967 ; Piéri, 1976 ; Boyer, 1982 ; Coppenet, 1986) ont montré que les engrais azotés acidifient les sols. Trois engrais sont à la base de l'acidification notamment le sulfate d'ammoniaque, le nitrate d'ammoniaque et l'urée.

A l'état pur le sulfate d'ammonium contient 21 % d'azote et 24 % de soufre. C'est l'un des engrais azotés régulièrement utilisés en zone tropicale. Il a néanmoins une action acidifiante nette, liée à la mobilité des bases qu'il induit et à l'entraînement de celles-ci par les eaux de drainage sous forme de nitrate et surtout de nitrate de calcium (Boyer, 1978). Il convient surtout aux sols à pH trop élevé. Blondel (1970) cité par Boyer (1978) a observé une baisse extrêmement rapide du pH de 6,4 à 4,8 lorsqu'on épand du sulfate superficiellement sans enfouissement dans les deux premiers centimètres du sol 48 heures après apport de 100 Kg d'azote (500 Kg de sulfate d'ammoniaque) dénotant ainsi un entraînement de bases du complexe absorbant par drainage.

Les nitrates et l'urée ont une action beaucoup moins acidifiante que le sulfate d'ammoniaque.

1.2.3 Mise en culture des sols

La mise en culture des sols et l'insuffisance des restitutions accélèrent la perte des cations alcalins (K^+ , Na^+) et alcalino terreux (Ca^{++} , Mg^{2+}) et leur remplacement par des cations plus acides (H^+ , Al^{3+} , Mn^{2+}) (Piéri, 1976 ; Ministère de l'agriculture du Burkina Faso, 1999). En effet, pour Soltner (1976), chaque récolte exporte en moyenne 50 à 80 kg de calcium /ha/ an. Ces exportations de calcium varient suivant les espèces cultivées. Les légumineuses en enlèvent beaucoup plus (Vilain, 1989). La culture continue sans restitution organo-minérale accentue le phénomène (Gros, 1974).

1.3 CONSEQUENCES AGRONOMIQUES DE L'ACIDIFICATION DES SOLS

L'acidité influence les caractéristiques physico-chimiques et la composition de la solution du sol et par conséquent, la nutrition minérale des plantes.

1.3.1 Incidences de l'acidité des sols sur les propriétés physiques

D'un point de vue physique, un sol qui se ressuie mal, qui absorbe lentement l'eau de pluie et qui est difficile à travailler présente ainsi les signes d'une acidité (Gros, 1974). Une acidité modérée n'entraîne pas une dégradation de la structure. Les accidents de structure interviennent à des pH inférieurs à 5 entraînant la destruction des réseaux cristallins des argiles (Vilain, 1989).

La prédominance du Mg sur le Ca dans les sols à argile 2/1 induit des structures grossières à éléments massifs et anguleux au lieu de structures grumeleuses et finement polyédriques qui sont de règle avec le calcium (Muller et Fastabend, 1963) cités par Boyer (1978).

L'aluminium présent dans le sol influence un certain nombre de propriétés mais son influence sur la couleur, la structure du sol est très faible. Les formes d'aluminium sont tenues pour responsables d'un certain nombre de caractéristiques.

Pour Boyer (1982), il semble exister dans la plupart des sols ferrallitiques acides subissant, des périodes sèches intenses et prolongées, un horizon de consistance à faible profondeur.

1.3.2 Incidence sur les propriétés chimiques du sol

L'une des principales conséquences de l'acidification est la tendance qu'a le complexe de se charger de quantités importantes d'ions H^+ au détriment des cations. Les travaux de Boyer (1978), Bado *et al.*, (1997) ont montré que le pH influençait généralement les mécanismes de fixation et d'échange d'éléments nutritifs. Le pH bien qu'étant le reflet relativement fidèle de la saturation du complexe absorbant en bases, est un indicateur des risques de toxicité engendrés par certains éléments comme l'aluminium et le manganèse (Boyer, 1982).

- Toxicité aluminique

La toxicité aluminique est reliée à la dynamique d'apparition de l'aluminium échangeable. Celle-ci étant liée à une baisse de pH lorsque la réaction du sol descend en dessous de pH 5,0 (Wild, 1994). La fixation de l'aluminium sur les sites d'échange, entraîne le blocage et la neutralisation presque totale des charges négatives. C'est souvent entre pH 4,5 et 5 que le sol devient électriquement neutre, alors que les charges variables deviennent pratiquement nulles (Uehara et Keng, 1975) cités par Boyer (1982). Le passage de l'aluminium échangeable dans la solution du sol est source d'acidité potentielle considérable par la libération de protons H^+ , d'où l'effet acide (Vilain, 1989). Ce sont ces formes qui sont susceptibles de passer dans la plante.

Certains auteurs ont relié les valeurs de toxicité aluminique aux valeurs de l'aluminium échangeable comme l'indique le tableau I. Quoique ces valeurs ne tiennent pas compte du milieu, elles sont néanmoins valables pour les sols ferrallitiques.

Tableau I : Toxicité aluminique chez quelques plantes

Espèce	Toxicité de l'aluminium échangeable	Type de sol	Auteur et lieu de l'étude
Arachide	seuil de toxicité 50 à 60ppm (0,55 à 0,66 mé/ 100g)	sol ferrallitique fortement désaturé	Velly (1974) Madagascar
Cotonnier	seuil de toxicité 25ppm (0,27mé/ 100g)	sol ferrallitique fortement désaturé	Velly (1974) Madagascar
Maïs	120-130ppm (1mé/100g)seuil de toxicité	sol ferrallitique fortement désaturé	Velly (1974) Madagascar

Source : Boyer (1982)

L'apparition de la toxicité aluminique est variable suivant les espèces végétales. Cependant, la toxicité est définie soit par considération des teneurs absolues ou par considération des valeurs relatives telle que la valeur « m » définie par la relation de Kamprath (1967). Elle s'écrit de la façon suivante :

$$m = \text{Al}^{3+} \times 100 / \text{Al}^{3+} + \text{SBE}$$

NB : m = relation de Kamprath, Al^{3+} = Aluminium échangeable (méq/100g de sol), SBE = Somme des bases échangeables (méq/100g de sol).

La relation a permis de situer dans les sols du Brésil, un seuil vers 45 à 50 au dessus duquel la culture de la plupart des plantes n'est plus possible.

- Toxicité manganique

Selon Bang *et al.*, (1971), pour les pH des sols inférieurs à 5,5, il y a une corrélation entre pH et teneur en Mn actif dans le sol. C'est à ces valeurs de pH que survient la toxicité manganique (Foy, 1984). Les effets sur la croissance des végétaux dépendent des propriétés du sol, de l'aération, de l'activité microbienne et du niveau de la matière organique.

Les teneurs absolues du sol en manganèse dit total ont relativement peu d'importance sur les phénomènes de toxicité manganique tout comme sur les carences. L'important est la conjonction entre pH et taux de manganèse (Foy, 1973).

- pH et l'assimilation du phosphore dans le sol.

Pour Boyer (1982), il est assez inhabituel que les sols ferrallitiques soient dépourvus de phosphore de façon tragique, bien que cette éventualité puisse se produire, et se produit notamment au Burkina Faso. Ceci s'explique souvent par des phénomènes d'insolubilisation de la majeure partie du phosphore par des oxydes et des hydroxydes de fer et parfois aussi d'aluminium (Segalen, 1973). Pour Foy (1978), la tolérance à l'aluminium coïncide avec la capacité de la culture à tolérer les bas niveaux de P dans la solution nutritive en présence d'aluminium. Ainsi la forme hautement assimilable c'est à dire celle du phosphore liée au calcium n'existe en quantité appréciable qu'en sols peu acides (pH entre 6 et 7). Foy (1979) note que les variétés de maïs développées en Amérique tropicale sont beaucoup plus tolérantes aux faibles teneurs en P que celles cultivées en climat tempéré. A pH supérieur ou égal à 7,5, le calcium a tendance à bloquer le phosphore sous forme tricalcique peu assimilable (Boyer, 1978).

Ainsi pour Boyer (1978), le pH n'est pas la cause directe de l'assimilation ou de la non assimilation du phosphore mais le reflet de l'abondance ou non de calcium sur le complexe absorbant du sol. En sol acide de pH inférieur à 6, le phosphore se combine au fer, et de ce fait devient moins facilement disponible pour les plantes. Ceci avec autant plus d'intensité que le pH est bas (Dabin, 1971).

- L'assimilation des oligo- éléments

Le pH du sol est le principal facteur qui régit l'assimilation des oligo-éléments. En effet, l'assimilation est décroissante si le pH augmente pour la majorité (bore, cuivre, zinc, manganèse) encore que pour le bore, cet effet semble être discuté (Oliver, 1974; Hatcher *et al.*, 1967) cités par Boyer (1978). Par contre pour Mo l'assimilation est croissante si le pH augmente.

- La matière organique (MO) et le cycle de l'azote

Soltner (1976) a effectué de telles analyses et nous lui emprunterons l'essentiel de ses conclusions.

Les bactéries ont un rôle important dans la décomposition et l'humification de la matière fraîche. Le ralentissement de la décomposition de la MO s'accompagne d'une diminution du dégagement de gaz carbonique.

- La décomposition de la lignine et de la cellulose est lente et peu efficace en milieu acide, seuls les champignons sont actifs et la décomposition des protéines est incomplète.
- La minéralisation de l'humus est lente aux pH très acides et s'accélère dès que le pH du sol atteint 5 lorsque les bactéries prennent le relais. De ce fait, on a pu ainsi relier le pH du sol à la teneur du sol en azote total.

1.3.3 Effets de l'acidité sur les propriétés biologiques des sols

L'acidité des sols affecte différemment l'activité de la microflore du sol ; ainsi, l'activité des bactéries ammonifiantes très faible en milieu fortement acide est maximale à pH 6. Tandis que pour les bactéries nitrifiantes, leur activité maximale se situe à pH 7,5.

Pour les bactéries fixatrices d'azote, genre *Rhizobium* elles sont plus sensibles au pH du sol. En effet en milieu acide avec des pH compris entre 5 et 5,5 ces bactéries dépérissent, puis meurent (Piéri, 1974), bien qu'il existe des cas où des *Rhizobium* vivent normalement à des pH légèrement inférieurs à 5 (Blondel, 1970).

La croissance des champignons et des bactéries varie sous l'action de l'acidité ou de l'alcalinité du milieu. En général, les bactéries réclament un milieu neutre ou légèrement alcalin alors que les champignons prospèrent plus facilement en sol acide (Singleton, 1994).

D'après Mutatkar (1966) cité par Dommergues et Mangenot (1970), il faut un pH inférieur à 4,4 pour que l'on observe une baisse significative du dégagement de CO₂ dans un sol ferrallitique renfermant 3% de carbone organique. La toxicité aluminique est réduite en présence d'ions calcium ou par apport de MO qui séquestre l'aluminium, et permet ainsi le développement d'*Azotobacter* des sols ou une teneur élevée en aluminium échangeable inhibe normalement ce microorganisme sensible. Il existe une certaine toxicité liée non pas au pH du sol mais à l'action toxique de l'ion Mn⁺⁺ tel est le cas de la toxicité manganique vis à vis de la symbiose *rhizobium*-légumineuses (Dommergues et Mangenot, 1970).

1.3.4 Effets de l'acidité sur les cultures

D'une manière générale, la réaction du sol influence la solubilité des éléments nutritifs de la solution du sol et partant la disponibilité des éléments du sol pour la plante. Un déficit en magnésium dans l'alimentation des plantes provoque le phénomène de chlorose dû à une synthèse insuffisante de chlorophylle (Velly et Roche, 1973). L'acidification affecte les cultures différemment. Dans le cadre d'une étude réalisée au Sénégal sur un sol dior (Piéri, 1976 a), la variété de mil "soua II", ne semble pas être affectée par l'acidité dans la gamme de pH allant de 4,5 à 6,8. Par contre l'arachide (les variétés 57 - 422 et 44 - 437) est sensible à l'acidité, notamment pour des pH inférieurs à 5,5. De ce fait le comportement des plantes est fonction du pH. Aussi distingue-t-on des plantes acidophiles, faiblement acidophiles, neutrophiles et indifférentes.

En sol acide, certains éléments deviennent toxiques pour les plantes cultivées. Les répercussions néfastes de l'acidité sur la physiologie des plantes et les baisses de rendement sont généralement attribuées à la présence d'aluminium solubles (Kamprath, 1973 ; Sanchez, 1976). Les effets de la toxicité aluminique se manifestent de façon indirecte car l'aluminium perturbe l'alimentation hydrique des plantes, inhibe

l'absorption du phosphore, du calcium, exalte au contraire celle du manganèse (Boyer, 1978 ; Coppenet, 1986). En effet, les effets de cet ion sur les végétaux sont fonction de la teneur en aluminium du sol et des solutions nutritives, de la plante sur laquelle les symptômes se manifestent, de la partie de la plante sur laquelle les effets de l'Aluminium sont particulièrement marqués.

De nombreux auteurs estiment que pour la plupart des végétaux supérieurs, la dose toxique de l'aluminium en solution se situe entre 1 et 2 ppm (Segalen, 1973). Ainsi le maïs réagit beaucoup plus à l'aluminium que le riz. Pour la plupart des plantes, le développement des racines est réduit de manière significative pour une teneur d'Aluminium échangeable de 1ppm et pour des teneurs de 2 ppm, le développement est interrompu (Segalen, 1973). Les feuilles sont également affectées, la hauteur des plantes est réduite et une diminution très sensible de la récolte est enregistrée. Chez le maïs, on a constaté une diminution de la teneur en calcium quand l'Al augmentait (Paterson, 1965).

Pour les plantes en général, l'excès d'aluminium interfère avec la division des cellules racinaires, la rigidité de la membrane cellulaire, la réduction de l'ADN répliqué, la fixation du phosphore dans les formes les moins disponibles, la diminution de la respiration racinaire et la réduction de la prise et du transport des nutriments indispensables tels que le calcium, le magnésium, et le phosphore (Foy, 1974).

La présence d'aluminium échangeable en grande quantité dans les sols acides à pH inférieurs à 5, induit des toxicités ne permettant plus comme spéculations que le pâturage extensif et la culture de certaines plantes tolérantes. L'aluminium échangeable n'existant que dans les sols acides et surtout fortement acides (Segalen, 1973), il est cependant difficile de déterminer si le problème de toxicité des plantes provient d'une ou de plusieurs toxicités ou d'une carence (Djondo, 1995).

Les symptômes les mieux connus de la toxicité manganique sur les plantes sont la présence de jeunes feuilles tordues et de taches chlorotiques sur les plus âgées. Toutefois, le problème de l'alimentation minérale des plantes peut également relever d'un déséquilibre nutritionnel que du problème spécifique lié à l'acidité du sol.

1.4 METHODE D'EVALUATION DE L'ACIDITE DES SOLS

L'évaluation de l'acidité d'un sol peut être appréciée sur une parcelle à un moment donné, en se basant sur le rendement de la culture ou en mesurant le pH de ce sol en tenant compte de la garniture cationique.

1.4.1 Mesure du pH

Selon Ritchie (1990), il existe diverses méthodes de mesure de pH, en raison de la grande diversité des sols. La mesure du pH constitue un moyen important pour apprécier l'aptitude d'un sol à assurer la croissance des végétaux.

Si de manière générale, on considère qu'un sol est acide dès que son pH est en dessous de 7, les termes employés (tableau II) pour qualifier la réaction du sol en fonction du pH peut être distinct suivant les références utilisées.

Tableau II : Qualificatifs de l'acidité du sol selon les systèmes américain (SSSA, 1987) et français (RPF, 1992)

N°	SSSA (1987) pH_{eau}	RPF (1992) pH_{eau}
1	extrêmement acide < 4,5	hyper acide <3,5
2	très fortement acide 4,5 à 5	très acide 3,5 à 4,2
3	fortement acide 5,1 à 5,5	acide 4,2 à 5
4	modérément acide 5,6 à 6	peu acide 5 à 6,5
5	légèrement acide 6,1 à 6,5	Neutre 6,5 à 7,5
6	Neutre 6,6 à 7,3	

Source : Djondo (1995)

Les valeurs de pH mesurées dans la solution de KCl seront étroitement corrélées à l'acidité d'échange. cette mesure plus stable apporte une information complémentaire

sur la sensibilité à l'acidité des sols, mesuré par l'écart $\text{pH}_{\text{eau}} - \text{pH}_{\text{KCl}}$ dès lors que leur phase liquide se concentre (Piéri, 1989). Ainsi la mesure de $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{eau}} - \text{pH}_{\text{KCl}}$ est un paramètre important pour apprécier la réactivité du complexe adsorbant en particulier dans les sols tropicaux à charges variables (Djondo, 1995).

1.4.2 Evaluation de la garniture cationique du complexe adsorbant

L'évaluation de l'acidité d'un sol concerne non seulement la concentration en ions H^+ du sol, mais aussi du degré de saturation du sol en bases (Duchaufour, 1979).

- ❖ Un pH bas correspond à un taux de saturation faible
- ❖ Un pH élevé correspond à un taux de saturation important

Mais pour des acidités moyennes, il n'existe pas de corrélations précises. Une corrélation nette entre le pH et le taux de saturation en bases n'est possible selon Soltner (1976) que dans les cas extrêmes. En effet, pour des sols ayant un même taux de saturation, plusieurs causes peuvent faire varier le pH, notamment :

- la nature des colloïdes
- la présence d'ions Al^{3+} et Fe^{2+}
- la nature des cations absorbés
- la tension du CO_2 en sol calcaire

Djondo (1995) montre que les conséquences agronomiques de l'acidité des sols s'expriment de façon indirecte sauf pour des valeurs extrêmes ($\text{pH} < 4$).

1.4.3 Dosage de l'aluminium échangeable

Les dosages de l'aluminium échangeable varient avec le type de sol. L'augmentation des teneurs en aluminium se faisant de manière exponentielle à des pH en dessous de 5,0, il serait donc très difficile de dégager une relation générale entre pH et teneur en aluminium échangeable, car les pentes des courbes d'apparition d'aluminium échangeable pour un pH donné sont assez variables.

Ainsi pour Godefroy (1974), entre pH 4,3 et 5,0, un horizon riche en matière organique développe 20 à 30 milliéquivalents d'aluminium échangeable de moins qu'un horizon argileux. Ceci est aussi bien valable pour les sols hydromorphes que ferrallitiques.

1.4.4 Rendement des cultures et l'aspect des récoltes

L'influence du pH sur les plantes cultivées met en exergue des notions importantes. Pour Boyer (1982), deux notions principales doivent être présentes à l'esprit :

- un intervalle de pH optimal : entre les deux valeurs limites, la plante aura une production maximale, toute autre condition étant égale par ailleurs.

- un intervalle de tolérance s'étalant de part et d'autre de l'intervalle optimal. La productivité y est inférieure à celle du cas précédent.

Ainsi pour Boyer (1978), le maïs cultivé à Madagascar sur les sols acides des hauts plateaux voit son rendement passer de 52 et 35 quintaux à l'hectare avec des pH respectivement de 4,08 et 3,67, et ceci bien que tous les éléments minéraux (exceptés le Ca et Mg) soient fournis en abondance.

Les différentes plantes présentent à cet égard une plus ou moins grande tolérance :

- aux excès de l' Al^{3+} et de Mn^{2+}
- aux faibles teneurs en Mn^{2+} et aux fortes teneurs en Al^{3+}
- aux faibles teneurs en Al^{3+} et aux fortes teneurs en Mn^{2+}

Cependant il faut être prudent car ces manifestations peuvent bien trouver d'autres causes (Duthil, 1973).

1.5 CORRECTION DE L'ACIDITE DES SOLS

Pour Djondo (1995), en raison des multiples facteurs pouvant favoriser la variation du pH au cours des années de culture, l'un des efforts consistera à le maintenir dans les limites compatibles avec la vie des microbes et de la plante. Les objectifs tendent à :

- corriger le déséquilibre nutritionnel;
- assurer une bonne garniture cationique du complexe d'échange;
- minimiser la solubilisation de l'aluminium;
- éliminer les toxicités aluminique et manganique. Et ce, par des apports d'engrais, d'oligo-éléments, d'amendements calcaires et calco-magnésiens et une bonne gestion de la matière organique.

Ainsi la nécessité d'utiliser des amendements calcaires s'avère indispensable. La toxicité aluminique disparaît en présence d'ions calcium. C'est ainsi que le chaulage lève la toxicité aluminique. Ce traitement permet par exemple le développement d'*azotobacter* dans des sols où une teneur élevée en aluminium échangeable inhibe normalement ce micro-organisme sensible (Dommergues et Mangenot, 1970).

De même, la toxicité aluminique est réduite par la matière organique qui séquestre l'aluminium : c'est l'effet complexant.

Toutefois, le choix du type d'amendement est guidé par des considérations d'ordre économique plus que par des aspects techniques ou d'efficacité des amendements. La détermination des doses doit tenir compte de la variabilité de la capacité d'échange en fonction du pH et en raison des rôles attribués à l'aluminium vis à vis de l'acidité et des qualités agronomiques des sols tropicaux (Foy, 1984).

De ce fait, il ne suffit pas de corriger le pH, ainsi que le niveau calcique et manganique du sol, encore faut-il, les entretenir. De même, la correction de l'acidité exige que l'on s'assure d'un point de vue chimique de la saturation du complexe absorbant, avant d'apporter au sol des quantités importantes d'engrais. En effet, pour Diehl (1975), on risque, faute de bases échangeables de perdre une partie des éléments fertilisants, ou de les voir fixés sous des formes difficilement assimilables.

1.6 TOLERANCE DU MAÏS AUX SOLS ACIDES

La toxicité des sols acides doit être considérée non pas comme un facteur isolé mais un facteur complexe qui peut affecter la croissance des différentes plantes, à travers différents processus physiques et biologiques, qui sont probablement contrôlés par différents gènes (Foy *et al.*, 1978). Or il s'avère que les variétés actuelles sont relativement peu adaptées à ce type de sol bien que l'espèce possède une variabilité certaine pour la tolérance aux sols acides (Granados, 1993).

La physiologie et l'hérédité de la tolérance aux sols acides sont encore mal connues pour le maïs. Diverses méthodes ont été élaborées pour la création de variétés tolérantes aux sols acides notamment au Brésil et en Colombie (Marchand, 1997). Celles-ci s'appuyaient sur :

- la sélection au champ sur sols acides
- la sélection *in-vitro* sur solution nutritive contenant l'élément identifié comme limitant.

1.7 MECANISME PHYSIOLOGIQUE DE TOLERANCE EN SOL ACIDE

La croissance des différentes espèces en sol acide dépend de leur relative tolérance à un certain niveau d'aluminium, de manganèse et de leur besoin en Ca et Mg. En sol acide, la croissance des plants est non seulement affectée par la toxicité aluminique mais par la faible disponibilité des éléments essentiels comme Ca, P, Mg, Fe qui sont complexés avec l'aluminium et par conséquent moins disponibles pour être pris par les racines (Hang, 1984 cité par Herrera, 1998). L'aluminium influe en dérangeant le

métabolisme de la plante et par conséquent la faible absorption d'éléments minéraux et d'eau. Toutefois, certaines plantes spécifiques exhibent une variabilité génétique dans leur capacité de tolérance à l'aluminium. Certaines indications montrent que plusieurs gènes contrôlent la tolérance à l'aluminium chez les espèces (Reid, 1971 cité par Sanchez, 1976). De même, certains génotypes ont des mécanismes qui leur confèrent une résistance à l'aluminium. Pour Spain *et al.* (1971) des différences substantielles existent entre les espèces dans leur relation de tolérance aux facteurs d'acidité des sols. Certaines de ces espèces (maïs, soja, riz) contiennent des gènes responsables de leur tolérance à des quantités élevées d'aluminium. Pour Sanchez (1994), plusieurs mécanismes impliqués ont été identifiés en relation avec la tolérance ou la sensibilité. Foy (1974) mentionne les différences au niveau de la morphologie des racines. Wild (1994) constate que les variétés tolérantes à l'aluminium n'inhibent pas l'absorption du P et sa translocation. Pour ce même auteur, les espèces et les variétés tolérantes à l'aluminium sont aussi tolérantes à des bas niveau de P. Sanilas et Sanchez (1976) suggèrent que la tolérance des variétés à des quantités élevées d'aluminium et à de basses quantités de P est due aux potentialités propres de la plante.

Chapitre 2 : Présentation du site d'étude et méthode d'étude

2.1. SITE D'ETUDE

2.1.1 Situation géographique

L'essai a été réalisé à la station expérimentale de Farako-Bâ. Cette dernière est située à 10 km au sud ouest de Bobo-Dioulasso sur l'axe Bobo-Banfora et couvre 475 ha avec des coordonnées géographiques de 4°20' de longitude ouest et de 11°06' de latitude nord. L'altitude est de 405 mètres au dessus de la mer.

2.1.2 Climat

Le climat est de type sud-soudanien (Guinko, 1984). La pluviométrie totale de l'année 2000 était de 1240 mm (figure 1). Deux vents principaux soufflent au cours de l'année et s'alternent pour marquer les saisons. Il s'agit de la mousson (vent humide venant du sud) qui souffle vers le nord Ouest dès le mois de mars et vers le nord le mois de mai. En octobre, un vent chaud et sec venant du Sahara (nord) appelé Harmattan accompagne la fin de la saison de pluie et marque le début de la saison sèche qui s'étend de mi-novembre à avril.

Cette saison sèche est fraîche jusqu'à la mi février (températures relativement basses pouvant atteindre 18°C, absence de précipitations), puis elle s'échauffe progressivement avec un maximum en avril. Une période chaude allant de mars en juin avec une température moyenne de 29°C (figure 2) pouvant dépasser les 35 °C en avril ; on peut déjà observer un premier régime de transition où l'air frais pénétrant de temps à autre annonce la saison de pluie allant de juillet en octobre.

L'humidité relative de l'air est de 55% avec un maximum de 79% en août et un minimum de 30 % (figure 2) en mars. L'évapotranspiration varie au cours de l'année. Elle est de 8,7 mm par jour entre janvier et février et de 3,7 mm par jour en août.

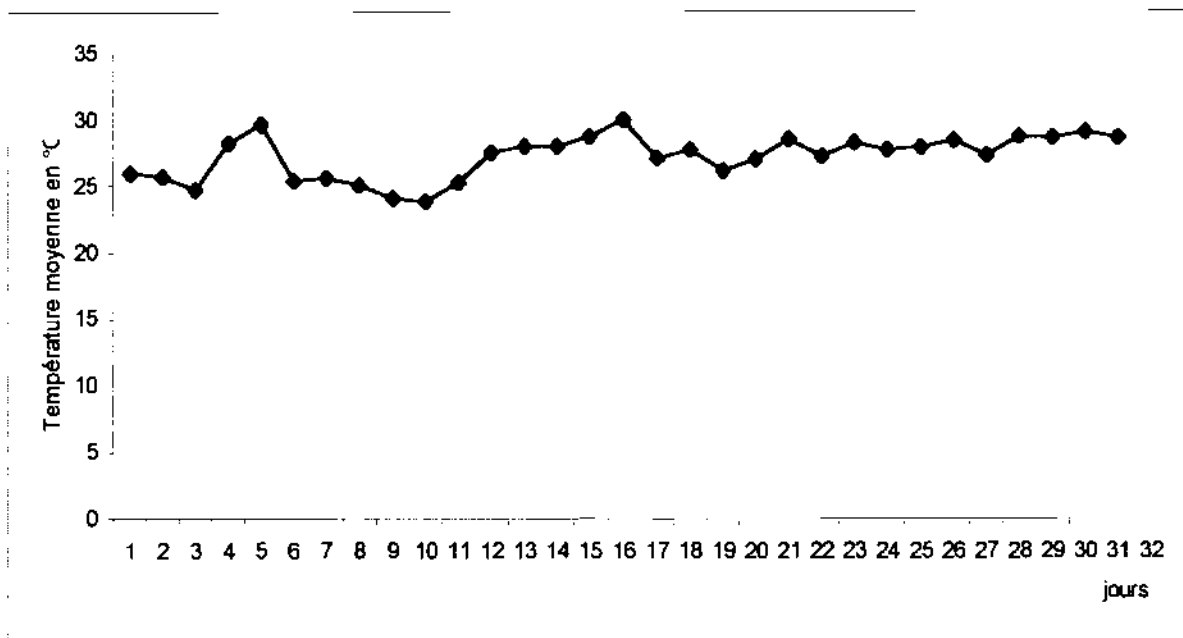


Figure 3 : Evolution de la température journalière du mois de mars 2001 à Farako-Bâ

2.1.3 Végétation

Selon IN.E.R.A (1994) les formations végétales de la station de Farako Bâ sont en grande partie composées de : *Parkia biglobosa*, *Detarium microcarpus*, *Khaya senegalensis*... Le tapis graminéen est constitué de *Andropogon spp*, *Pennisetum pedicelatum*, *Eragrostis tremula*...

2.1.4 Sols

D'après Jenny (1965) cité par Morant (1984), les sols de la station de Farako-Bâ sont des sols rouges faiblement ferrallitiques (parcelles Nord et Ouest). La pente moyenne est de 2%. De texture sablo-limoneuse en surface à argilo-sableuse en profondeur, le pH des sols est compris entre 5 et 5,5 avant la mise en culture. Ce sont des sols de bonne perméabilité, mais très sensibles à l'érosion.

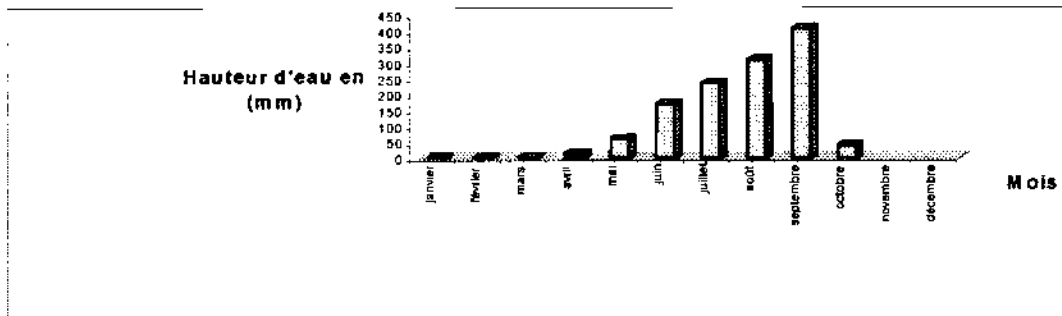


Figure 1 : Répartition mensuelle de la pluviométrie de Farako-Bâ (2000)

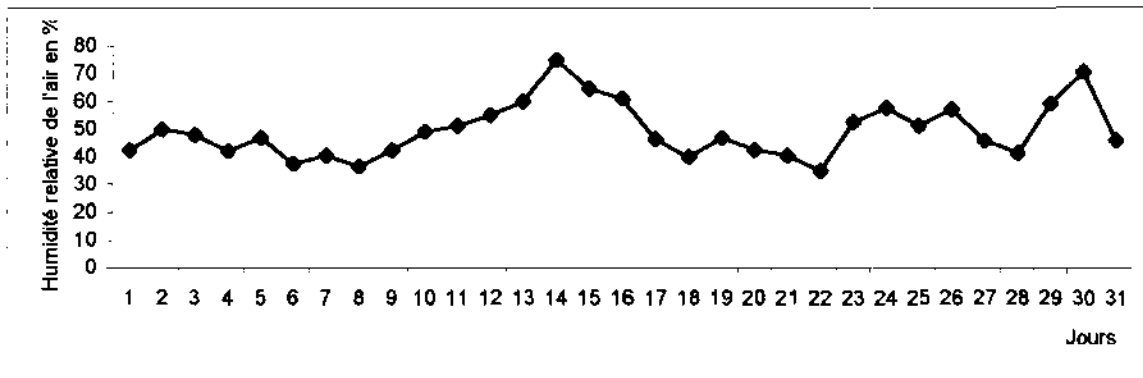


Figure 2 : Evolution de l'humidité relative journalière de l'air à Farako-Bâ (mars 2001)

2.2. MATERIEL ET METHODE

Les essais ont été conduits en deux phases :

- un essai préliminaire d'incubation des sols en vue de déterminer la dose de chaux à apporter (réalisé au mois d'octobre).
- deux essais en vase de végétation pendant la période allant du 1^{er} mars au 7 avril 2001 en vue d'évaluer les différentes lignées. Les différents paramètres des plants de maïs ont été mesurés au 30^{ème} jour après semis. Le dispositif expérimental pour chaque essai est un factoriel comportant 50 lignées et deux types de sols (sol acide et sol amendé avec de la chaux éteinte).

2.2.1 Essai préliminaire d'incubation des sols

Le but de l'essai préliminaire était de déterminer la dose de chaux qui permettrait de neutraliser le sol. Un essai préliminaire de détermination de doses de chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) à apporter a été effectué. Pour le choix des doses d'application, des doses croissantes de chaux ont été apportées sur des échantillons de sol maintenus pendant 30 jours à 30°C et à une humidité correspondant au $\frac{3}{4}$ de la capacité maximale de rétention du sol.

2.2.1.1 Matériel

2.2.1.1.1 Sol

Les échantillons de sol utilisés proviennent de l'horizon de surface (0-20 cm) d'un sol de type faiblement ferrallitique, à texture sablo-limoneuse d'un essai de longue durée intitulé « Essai Entretien de la fertilité». Ce sol est soumis depuis 1982 à une exploitation continue et à une fertilisation assurée par la fumure minérale : NPKSB (14-23-14-6-1) = 150 kg/ha ; Urée = 150 kg/ha ; KCl = 50 kg/ha. Des analyses de sol réalisées en 1997 sur cet essai donnent les résultats mentionnés dans le tableau III.

Tableau III : Caractéristiques chimiques d'un échantillon de sol de l'essai Entretien ; horizon 0-20 cm

Caractéristiques chimiques	Valeurs (1997)
N (mg/Kg)	222
C (%)	0,23
P (ppm)	23,9
CEC (méq/100g)	1,41
K ⁺ (méq/100g)	0,29
Ca ²⁺ (méq/100g)	0,32
Mg ²⁺ (méq/100g)	0,11
Na ⁺ (méq/100g)	0,03
pH _{eau}	4,7
pH _{kcl}	3,6

Source: Bado *et al.*, (1997).

Une analyse récente (août 2000) d'un prélèvement de l'horizon 0-20cm du sol étudié faite au BUNASOLS donne une valeur de 5387,4 ppm pour l'aluminium total et une valeur de 323,8 ppm (3,6 méq/100g de sol) pour l'aluminium échangeable. Cette valeur dépasse largement le seuil de toxicité du maïs qui est de 1 méq pour 100g de sol (Boyer,1982). Les mesures du pH ont conduit aux résultats suivants :

pH_{eau} = 4,8 et pH_{kcl} = 3,9. C'est un sol très fortement acide

2.2.1.1.2 Traitements

Quinze doses croissantes de chaux éteinte (0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45 g/Kg) représentant les 15 traitements sont appliquées en plus du témoin sans apport de chaux durant 30 jours.

2.2.1.2 Méthode d'étude

2.2.1.2.1 Mise en pot.

Un kilogramme de terre séchée, tamisée à 2 mm est placée dans chaque pot qui reçoit la dose de chaux correspondante. Une homogénéisation est faite et on détermine la quantité d'eau à apporter.

2.2.1.2.2 Mesure de la capacité maximale de rétention du sol (CMR).

Cette opération consiste à placer un entonnoir sur une éprouvette graduée de 100 cm³, à mettre un papier filtre dans l'entonnoir dans lequel sont déposés les 100 g de terre de l'échantillon à tester. Il faudra au préalable imbiber le papier filtre, pour éviter qu'il ne retienne 2 à 4 cm³ d'eau. On laisse ensuite percoler 100 cm³ d'eau, et on attend que le liquide ne goutte plus à la pointe de l'entonnoir pour lire le volume d'eau en cm³ dans l'éprouvette. La CMR s'obtient alors par la différence entre la quantité d'eau de départ et celle retenue dans l'éprouvette. La valeur de la CMR obtenue est de 34,5 ml pour 100 g de terre. L'humidité des sols est maintenue au 3/4 de la CMR ce qui correspond à 26 ml pour 100 g de sol.

2.2.1.2.3 pH

La mesure du pH est faite par la méthode électrométrique à l'électrode de verre (pHmètre Tacussel). A partir d'un échantillon de 20g de terre séchée et tamisée à 2mm dans un rapport sol/solution de 1/2,5 suivant qu'il s'agisse du pH_{eau} ou du pH_{KCl}.

pH_{eau} ; dans un bêcher de 100 ml, on ajoute 50 ml d'eau distillée à l'échantillon de terre. Après agitation puis repos (60 mn), on trempe l'électrode de verre du pH mètre dans la solution de sol et on lit directement la valeur affichée.

Le pH_{KCl} est relevé après mesure du pH_{eau}, en rajoutant 3,7g de KCl à la solution. On agite alors pendant 5 à 10 minutes et on laisse reposer pendant quelques minutes avant de procéder à la mesure du pH_{KCl}.

A partir des résultats obtenus mentionnés dans le tableau 4, on retiendra la dose correspondant au pH proche de la neutralité.

2.1.2.4 Résultats et discussion de l'essai préliminaire

Le tableau IV présente les résultats obtenus.

Tableau IV : Effet des différentes doses de chaux sur le pH_{eau} et pH_{KCl} du sol après l'incubation.

Quantité de chaux (g/kg)	pH_{eau}	pH_{KCl}
0	4,8	3,9
0	4,9	4,1
0,2	5,2	4,3
0,4	6,2	4,9
0,8	7,5	6,5
1,0	7,9	7,0
2,0	8,6	8,1
5,0	9,0	8,6
10,0	9,4	9,2
15,0	9,5	9,3
20,0	9,6	9,4
25,0	9,7	9,4
30,0	9,7	9,5
35,0	9,7	9,5
40,0	9,8	9,5
45,0	9,7	9,5

Les doses appliquées présentent toutes un effet positif sur l'augmentation du pH. Le sol prélevé qui, au départ avait un pH très fortement acide (pH_{eau} 4,8 et pH_{KCl} 3,9), voit son

pH augmenter avec l'apport d'amendement calcique. La dose de 0,4 g/Kg permet de relever le pH_{eau} du sol à 6,2. Cela suffirait à neutraliser les ions toxiques Al^{3+} . L'élévation du pH du sol jusqu'au voisinage de la neutralité par apport de doses plus fortes d'amendements calciques n'est pas souhaitable, ni sur le plan agronomique ni sur le plan économique (Piéri, 1976 cité par Kambiré, 1989).

La forte acidité de départ de ce sol ($pH_{eau} = 4,8$) est sans doute liée à la présence d'une importante quantité d'aluminium échangeable dans le sol. En effet l'analyse de sol révèle 3,6 méq d'aluminium pour 100g de sol. Ce qui va en accord avec les données de Segalen (1973) ; Foy (1974) et de Boyer (1982) qui montrent que c'est en dessous de pH 5 que l'on peut redouter la présence des ions toxiques comme l'aluminium échangeable. Le relèvement rapide du pH avec de faibles quantités de chaux est fortement liée au type de sol. En effet pour Gros (1974), un sol peu tamponné comme un sol sableux s'il est acide se neutralisera plus aisément. Soulignons toutefois que pour Boyer (1982), ce relèvement rapide de pH est attribuable à l'absence d'hydroxydes amorphes dans ce sol qui ne peuvent de ce fait entraîner les effets d'un double tampon acide.

En conclusion, ces résultats montrent qu'il y a une réponse beaucoup plus marquée du sol à l'apport de chaux. Les doses utilisées en apport de redressement visent à rétablir le pH et le taux de Ca^{2+} à un niveau normal (Diehl, 1975). Cette augmentation dépend :

- des caractéristiques de l'amendement ; d'un point de vue chimique, le calcium contenu dans la chaux éteinte est un régulateur du pH du sol.
- de la durée de contact sol et solution, de la manière dont l'incorporation a été faite, du matériel utilisé, de l'humidité du sol et l'homogénéisation du mélange obtenu, le mode de séchage et de stockage de l'échantillon entre le prélèvement et la mesure au laboratoire, et enfin de la position de l'électrode dans la suspension (Guilleman, 1991).
- de la quantité de chaux apportée.

- des caractéristiques chimiques du sol. D'elles dépendent la dissolution du calcaire et la diffusion de l'alcalinité dans le reste du sol.

En définitive, la méthode d'incubation des sols avec des doses croissantes d'amendement bien qu'étant longue permet d'établir une relation précise entre le pH du sol et les doses à apporter.

2.2.2 Essai d'évaluation des 100 lignées

2.2.2.1 Matériel

2.2.2.1.1 sol

Les échantillons de sol utilisés ont la même origine que ceux utilisés lors de l'essai préliminaire d'incubation des sols.

2.2.2.1.2 Végétal

Le matériel végétal est constitué de deux groupes de lignées de maïs en 8^{ème} génération pour les lignées MAKKA et en 2^{ème} génération pour les QPL, qui sont encore en disjonction à différents niveaux de sélection (Sanou, com. Per.).

❖ Les lignées MAKKA

Ce sont des lignées sélectionnées pour la tolérance à la sécheresse, présentant une bonne rusticité et de bonnes qualités gustatives. Au total 50 lignées MAKKA sont concernées. Le tableau V donne les caractéristiques de ce matériel.

Tableau V: Caractéristiques des MAKAs

Cycle semis floraison mâle	52 –63 jours
Cycle semis maturité	88-96 jours
Hauteur de la plante	95-218 cm
Hauteur d'insertion de l'épi	38-132 cm
Résistance à la verse	1*
Résistance à la casse	1*
Helminthosporiose	Tolérante
Rouille	Tolérante
Viroses	Sensit ^{iv}
Couleur du grain	Jaune
texture du grain	corné
Moyenne en essai des parents Maka	3,1t/ha
Aire de culture	<600mm
Intensification	Agriculture moderne et améliorée

Source : Sanou (1993) et Sanou (2001, com. Pers.). * échelle de 1 à 5

❖ Les lignées QPL

Les lignées QPL sont extraites de la variété FBQPM1 (Farako Bâ Quality Protein Maize) qui est riche en protéine. L'extraction des lignées QPL en cours concerne la séparation des différentes couleurs, leur tolérance à l'acidité, à la sécheresse, et au Striga.

Les lignées QPL présentent les caractéristiques suivantes :

- Hauteur des plants : 45-186 cm
- Hauteur d'insertion de l'épi : 25-85 cm
- Nombre de feuilles au-dessus de l'épi : 5-7
- Nombre d'épis par plante : 1-1,4
- Nombre de racines coronaires : 0-2

Au total 50 lignées QPL ont été testées pour cette étude.

NB: les noms des lignées étant composés de 10 numéros au maximum, nous nous sommes permis de les renommer (annexe 1 et 2) pour faciliter la suite des opérations.

2.2.2.1.3 Fertilisants

Ils sont apportés sous la forme minérale : urée à 46% d'azote, chlorure de potassium (KCl) à 60% de K_2O , le triple super phosphate (TSP) à 46 % de P_2O_5 .

Les doses sont les suivantes : Urée 32,6 mg/Kg de sol, TSP 78,26 mg/Kg de sol, KCl 55 mg/Kg de sol.

La dose de chaux éteinte (70,5 % de CaO) utilisée comme amendement, est apportée conformément à la dose neutralisante trouvée pendant le test d'incubation, soit 0,4 g de $Ca(OH)_2$ /kg de sol.

2.2.2.2 Méthode d'étude

2.2.2.2.1 Dispositif expérimental

C'est un dispositif factoriel en Split Plot. Les deux facteurs sont : l'acidité (ou type de sol) et les lignées. Le facteur acidité compte deux niveaux qui sont répétés trois fois (Annexe 5). Le facteur « lignées » compte 50 niveaux correspondant aux 50 lignées

Maka ou aux 50 lignées QPL. La liste des lignées et le dispositif expérimental sont donnés en annexe 1, 2 et 5.

2.2.2.2 Mise en place de l'essai

Les échantillons de sols prélevés à l'aide d'une tarière sont mélangés de façon homogène, séchés à l'air libre et passés au tamis de 2 mm. L'échantillon de sol est ensuite séparé en deux parties égales. Une partie est constituée par le témoin et l'autre partie reçoit la chaux. La chaux est apportée sous forme de poudre et répartie de façon homogène. La terre sera mélangée jusqu'à homogénéisation parfaite avant d'être placée dans les pots en plastique. Le poids de la terre sur lequel porte l'expérimentation est de 1 kilogramme. Le niveau de sol après tassement est à 3 cm du bord supérieur du pot.

2.2.2.3 Semis

La surface de la terre dans le pot est soigneusement aplanie, à l'aide d'une matrice en bois permettant d'amener par un léger tassement le niveau de sol à 3 cm du bord supérieur du pot. Le semis est fait à la main ; une graine par pot. Puis, la semence est recouverte d'une mince couche de terre.

2.2.2.4 Dose d'arrosage

L'humidité du sol est maintenue aux quatre neuvième de la capacité de saturation soit 15,3 ml d'eau pour 100 g de sol et l'arrosage se fait par pesée jusqu'à la levée (Chaminade, 1965). Au cours de la végétation, ce pourcentage est amené progressivement aux deux tiers de la CMR (23 ml pour 100 g de sol) car il importe pour des raisons physiologiques que l'apport d'eau par arrosage soit progressive, c'est à dire être fonction du développement des racines afin d'éviter les phénomènes d'asphyxie.

2.2.2.5 Mesures

Les mesures sont effectuées 30 jours après semis (30 JAS) dans chaque pot et concerne la longueur, la largeur des feuilles, la hauteur des plantes, le nombre de feuilles et la surface foliaire. La longueur et la largeur des feuilles sont mesurées à l'aide

d'une toise graduée . Seules les feuilles complètement déployées étaient concernées par la mesure.

La hauteur des plantes

La hauteur est obtenue à l'aide d'une d'une toise graduée , allant de la base du plant jusqu'à la sortie de la dernière feuille.

Le nombre de feuilles

Le nombre de feuilles est obtenu par simple comptage.

Surface foliaire des plantes

La méthode utilisée est la méthode de dimensions linéaires de Durcan (HASSANI, 1989). Connaissant la longueur et la largeur des feuilles, on multiplie par un coefficient : $S = L * l * 0,75$. Cela donne la surface foliaire par plante.

S= Surface foliaire (cm²)

L = Longueur de la feuille (cm)

l = largeur de la feuille (cm)

Biomasse aérienne

La coupe est faite aux ciseaux, suivant le plan horizontal défini par le bord supérieur du pot, les racines n'étant pas prises en compte. Après pesée de la matière fraîche, les plants seront placés dans une étuve à 80°C pendant 24 heures, afin d'obtenir le poids de la matière sèche.

Biomasse racinaire

A l'issue de la coupe, l'ensemble est dépoté et le sol dispersé sous le jet d'eau d'un robinet. Les racines sont récupérées sur un tamis à mailles de 2 mm, rincées abondamment à l'eau, puis mises à sécher dans une étuve comme précédemment avant de déterminer la matière sèche des racines.

Le volume racinaire

Il résulte de la différence de volume en cm^3 obtenue après trempage des racines d'un plant dans une éprouvette graduée de 100 cm^3 contenant 50 cm^3 d'eau.

2.2.2.2.6 Traitements statistiques des données

Les données ont été saisies à partir d'Excel. L'analyse statistique des données (analyse de variance, séparation des moyennes, corrélation) a été réalisée avec le logiciel GENSTAT.

Chapitre 3 : Résultats et discussion

3.1. RESULTATS

3.1.1 Comportement des lignées Maka

Au cours de l'expérimentation, les observations ont conduit aux résultats suivants : sur les 300 pots ensemencés avec les graines des 50 lignées Maka (50 lignées x 2 traitements x 3 répétitions) :

- 35 % des pots n'ont pas levé en sol acide contre 28 % en sol chaulé ;
- 6 % des plants levés sont morts 10 jours après semis en sol acide contre 3 % en sol chaulé ;
- 20 jours après semis, on a enregistré en sol acide une mortalité de 6% des plants levés contre 0 % en sol chaulé.

L'analyse des données a finalement concerné 32 lignées pour lesquelles toutes les données sont complètes.

Les résultats de l'analyse de variance réalisés sur les 32 lignées MAKKA sont présentés dans le tableau VI. Les coefficients de variation sont élevés la biomasse racinaire (16,3 %) et le volume racinaire (24,23 %). Le coefficient de variation le plus faible est noté sur le paramètre « nombre de feuilles par plant » (10 %). L'analyse de variance montre que les différences entre les « types de sol » sont statistiquement significatives ($p = 0,001$) pour l'ensemble des paramètres. Il en est de même pour le facteur « lignée ». L'interaction sol-lignée est également très hautement significative ($p = 0,001$) pour tous les paramètres.

Tableau VI : Résultats de l'analyse de variance pour les lignées Maka

Source de variation	Biomasse aérienne (g/plante)	Biomasse racinaire (g/plante)	Volume racinaire (cm ³ /plante)	Surface foliaire (cm ² /plante)	Hauteur des plantes (cm/plante)	Nombre de feuilles/ plante
F « type de Sol »	154,23	60,60	74,74	322,25	101,47	91,46
P « type de sol »	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
F Lignée	40,18	32,78	13,6	30,37	12,02	9,61
P Lignée	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
F Sol-lignée	19,41	13,38	7,47	16,59	11,28	5,54
P Sol- lignée	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Coefficient de variation (%)	13,1	16,3	24,2	13,5	10,3	10

F= F calculé

P= Propabilité

3.1.1.1 Effet du « type de sol » sur les lignées

Les résultats de comparaison de moyennes (tableau VII) montrent qu'il y a un effet chaux sur l'ensemble des caractères étudiés. Des différences significatives sont observées pour toutes les variables pour les deux types de sol.

Tableau VII : Comparaison des moyennes des différents caractères en fonction des «types de sol »

Source de variation	Traitements	Biomasse aérienne (g/plante)	Biomasse racinaire (g/plante)	Volume racinaire (cm ³ /plante)	Surface foliaire (cm ² /plante)	Hauteur des plantes (cm/plante)	Nombre de feuilles/plante
Type de sol	Sol acide	0,50 b	0,26b	2,52b	149 b	12,40b	5b
	Sol chaulé	0,62a	0,31a	3,42a	213a	14,40a	6a
signification		HS	HS	HS	HS	HS	HS
Isd _{0,05}		0,02	0,013	0,20	6,99	0,39	0,15

NB. Les moyennes suivies d'une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes (p<5%). HS = Hautement Significatif

Le sol chaulé présente une biomasse aérienne (0,62 g/plante) significativement plus élevée par rapport au sol acide (0,50 g/plante). Il en est de même pour la biomasse racinaire : 0,31g en sol chaulé contre 0,26 g en sol acide. On note une bonne efficacité de l'amendement calcique sur le volume racinaire. Le volume racinaire moyen est de 2,52 cm³/plante en sol acide et de 3,42 cm³/plante en sol chaulé. Il y a un effet positif significatif de la chaux sur l'élaboration de la surface foliaire (augmentation de 63,4 cm² par rapport au sol acide). Quant à la hauteur des plantes et au nombre de feuilles, on observe également un effet positif et significatif de la chaux.

Le tableau VIII donne en pourcentage l'effet de la chaux calculé par la formule suivante :
effet chaux = (VSC-VSA) x 100/ VSA

L'amendement du sol acide avec de la chaux permet une amélioration de tous les paramètres.

Tableau VIII : Effet moyen du chaulage sur les caractères agromorphologiques des lignées MAKa.

Variables	sol acide	Sol chaulé	Effet du chaulage
Biomasse aérienne (g/plante)	0,50	0,62	24,0%
Biomasse racinaire (g/plante)	0,26	0,31	19,2%
Volume racinaire (cm ³ /plante)	2,52	3,42	35,7%
Surface foliaire (cm ² /plante)	149	213	42,9%
Hauteur des plantes (cm/plante)	12,40	14,40	16,1%
Nombre de feuilles/plante	5	6	20,0%

3.1.1.2 Variabilité des caractères en fonction des lignées : effet lignée

Le comportement des lignées quel que soit le type de sol est résumé dans les tableaux IX (partie aérienne de la plante) et X (partie souterraine de la plante). Pour chaque caractère, une classification des lignées est établie en fonction de leurs performances.

Biomasse aérienne

La biomasse varie de 0,22 à 1,09 g par plante. La lignée 23 a produit une biomasse aérienne qui est significativement plus élevée que les autres (1,09 g). Elle est suivie de la lignée 7 (0,91 g). Les valeurs minimales sont obtenues par les lignées 1 et 4.

Hauteur des plantes

La hauteur des plantes varie de 8,12 cm à 18,58 cm. La lignée 30 possède la hauteur la plus élevée (18,58). Elle est suivie par les lignées 18, 32, 3 et 22.

Nombre de feuilles

Contrairement aux autres paramètres, la variabilité est moins importante (cv = 10%) par rapport à cette variable « nombre de feuilles ». En effet, le nombre de feuilles varie de 4 à 7. La lignée 8 possède un nombre de feuilles significativement plus élevé que les autres. Elle est suivie par les lignées 18, 7, 30, 32 et 21. Les lignées 31, 6, 24, 12 et 25 ont moins de feuilles.

Surface foliaire

Les lignées 18, 23 et 32 possèdent les surfaces foliaires les plus élevées (285,8 cm²). A l'opposé, les lignées 1 et 4 ont des surfaces foliaires ne dépassant pas 70 cm². Les autres lignées ont des surfaces foliaires intermédiaires variant de 131 à 245 cm².

Biomasse racinaire

La biomasse racinaire varie de 0,14 à 0,58 g de matière sèche par plante. Les lignées 12, 14, 15, 4 et 1 ont les plus faibles biomasses racinaires. Par contre les lignées 7, 5, 32 et 23 enregistrent les plus fortes productions de biomasse racinaire (valeurs comprises entre 0,46 et 0,58 g/plante).

Volume racinaire

Les lignées 32, 5, 17 et 18 possèdent les valeurs les plus élevées (de 4,38 à 5,06). Elles sont suivies par les lignées dont les valeurs vont de 3,40 à 4,17 cm³. Ce sont les lignées 3, 20, 26, 10, 8 et 23. Le plus grand nombre de lignées ont des volumes racinaires qui se situent entre 2,05 et 3,27 cm³. Les lignées ayant les plus faibles valeurs sont les lignées 1, 4, 2, 24, 15, 31 et 14.

Tableau IX : Performance des lignées en fonction des paramètres liés à la partie aérienne (classification par ordre croissant)

N°lignée	Biomasse aérienne (g/plante)	N°lignée	hauteur des plantes (cm/plante)	N°lignée	nombre de feuilles/plante	N°lignée	surface foliaire (cm ² /plante)
4	0,22	4	8,12	31	4,33	1	58,30
1	0,24	24	9,33	6	4,50	4	69,40
12	0,34	6	11,12	24	4,50	31	115,10
21	0,34	1	11,13	12	4,50	24	122,60
13	0,35	15	11,50	1	4,50	13	131,80
2	0,39	5	12,22	25	4,67	2	134,30
31	0,39	12	12,25	13	5,00	15	136,20
14	0,42	8	12,28	11	5,00	21	138,90
15	0,43	17	12,58	3	5,00	6	140,90
11	0,44	14	12,83	26	5,00	9	149,90
24	0,44	19	12,92	15	5,00	12	161,30
6	0,48	25	13,12	16	5,17	11	162,60
27	0,50	31	13,13	22	5,17	3	165,90
25	0,53	2	13,20	19	5,17	20	167,50
9	0,54	28	13,22	17	5,17	14	175,00
26	0,55	29	13,35	5	5,17	16	176,20
20	0,56	11	13,42	20	5,33	25	182,30
29	0,57	16	13,55	2	5,50	19	182,40
3	0,57	7	13,58	14	5,67	5	190,50
22	0,58	10	13,75	4	5,67	30	191,10
16	0,58	9	13,83	27	5,67	7	195,90
30	0,59	13	14,00	28	5,83	28	204,80
19	0,62	20	14,08	23	5,83	26	207,60
28	0,65	26	14,43	29	5,83	8	211,90
8	0,66	23	14,50	9	5,83	27	225,40
17	0,69	27	14,62	10	5,83	17	228,40
5	0,70	21	14,83	21	6,17	22	237,20
10	0,71	22	15,28	32	6,33	29	245,10
18	0,79	3	15,42	30	6,33	10	254,70
32	0,81	32	15,68	7	6,33	32	258,30
7	0,91	18	16,00	18	6,50	23	281,10
23	1,09	30	18,58	8	7,17	18	285,80
lsd _{0,05} =	0,082	lsd _{0,05} =	1,57	lsd _{0,05} =	0,62	lsd _{0,05} =	27,95

Tableau X : Performance des lignées en fonction des paramètres liés à la partie souterraine (classification par ordre croissant)

N°lignée	biomasse racinaire (g/plante)	N°lignée	volume racinaire (cm ³ /plante)
12	0,14	1	1,20
14	0,15	4	1,33
15	0,15	2	1,61
4	0,17	24	1,70
1	0,18	15	1,71
21	0,20	31	1,77
13	0,20	14	1,82
26	0,20	13	2,05
11	0,21	11	2,18
2	0,22	25	2,38
31	0,22	16	2,46
22	0,23	6	2,48
20	0,23	27	2,54
25	0,24	21	2,55
30	0,24	29	2,68
24	0,26	12	2,76
28	0,26	28	2,93
19	0,26	30	3,03
6	0,27	22	3,15
16	0,29	9	3,23
8	0,31	19	3,27
17	0,31	3	3,40
27	0,33	20	3,48
9	0,35	26	3,81
29	0,38	10	3,92
3	0,38	8	4,05
10	0,38	23	4,08
18	0,42	7	4,17
7	0,46	32	4,38
5	0,47	5	4,75
32	0,48	17	5,03
23	0,58	18	5,06
Isd_{0,05} =	0,053	Isd_{0,05} =	0,82

3.1.1.3 Interaction sol-lignée : variation de l'effet du chaulage en fonction des lignées

Les résultats sont regroupés dans les tableaux XI, XII, XIII, XIV, XV et XVI.

Biomasse aérienne

La biomasse aérienne varie de 0,18 g à 1,14 g/plante en sol acide et de 0,31 g à 1,04 g/plante en sol chaulé (Tableau XI). Un grand nombre de lignées voit leur biomasse aérienne augmenter et ce, de façon significative en sol chaulé. Au total 15 lignées sont concernées par cette observation. Par contre pour les 12 autres lignées aucune différence significative n'est observée. Pour neuf lignées l'effet du chaulage est négatif.

Hauteu des plantes

En ce qui concerne la hauteur des plantes, elle varie de 5,83 cm à 18,67 cm en sol acide contre 12,83 et 18,5 cm en sol chaulé (Tableau XII). Les hauteurs les plus élevées sont obtenues par la lignée 30 pour les deux types de sol. On constate que pour la plupart des lignées aucune différence significative n'est observée bien que pour certaines lignées, on observe un effet dépressif de la chaux sur la hauteur des plantes. L'effet de la chaux dans l'ensemble est faible.

Nombre de feuilles

L'application de la chaux a un effet significatif sur un total de 19 lignées : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 17, 19, 20, 21, 22, 24, 29, 32 (Tableau XIII). Les 18 autres lignées ne présentent pas de différences significatives entre les valeurs obtenues dans les deux « types de sol ».

Surface foliaire

En sol acide, la surface foliaire minimale est de 31,1cm² et la surface foliaire maximale de 272,3 cm² (Tableau XIV). En sol chaulé, elle varie entre 37,7 et 355,4 cm²/plante. Dans l'ensemble, on observe une augmentation de la surface foliaire lorsqu'on apporte de la chaux. Des différences significatives sur un total de 21 lignées sont observées.

Cependant trois lignées notamment les lignées 4, 13, 2 ont leur surface foliaire qui diminue en sol chaulé (diminution de plus de 50%) et ce de façon significative.

Biomasse racinaire

Aucune différence significative n'est observée sur un total de 17 lignées (Tableau XV). C'est le cas des lignées 11 et 25 où on note des biomasses racinaires pratiquement identiques pour les deux types de sol. On a pour les lignées 11 et 25 respectivement les biomasses racinaires suivantes : 0,21g en sol acide contre 0,22 g en sol chaulé pour la lignée 11 ; 0,24 g en sol acide contre 0,25 g/plante en sol chaulé pour la lignée 25. Un effet dépressif du chaulage sur la surface foliaire est observé sur douze lignées.

Volume racinaire

Le volume racinaire des plants de maïs en sol chaulé (tableau XVI) varie entre 2,73 cm³ et 5,67 cm³/pot et en sol acide entre 0,75 et 5,67 cm³/pot. Les lignées 1, 6, 24, 21 ont des valeurs inférieures à 1cm³. Les lignées 7, 17 et 18 ont un volume en sol acide voisin de 5 cm³. L'apport de chaux a un effet significatif que sur un total de 18 lignées et un effet non significatif sur 14 lignées. L'effet dépressif n'est observé que sur dix lignées.

Tableau XI: Effets des traitements sur la biomasse aérienne des lignées(g/plante).

N° Lignée	sol acide	sol chaulé	effet chaux	Signification lsd _{0,05} =0,12
2	0,58	0,20	-0,37	s
4	0,31	0,14	-0,17	s
7	1,08	0,73	-0,35	s
30	0,67	0,51	-0,16	s
8	0,75	0,58	-0,17	s
13	0,39	0,30	-0,09	ns
26	0,58	0,52	-0,07	ns
23	1,14	1,04	-0,10	ns
15	0,44	0,43	-0,01	ns
18	0,78	0,79	0,01	ns
19	0,61	0,62	0,01	ns
32	0,78	0,84	0,06	ns
25	0,50	0,55	0,05	ns
9	0,51	0,58	0,07	ns
22	0,54	0,61	0,08	ns
17	0,64	0,74	0,10	ns
14	0,37	0,48	0,11	ns
27	0,42	0,58	0,16	s
12	0,27	0,41	0,14	s
10	0,56	0,86	0,30	s
11	0,34	0,54	0,19	s
3	0,44	0,70	0,26	s
21	0,26	0,42	0,16	s
29	0,41	0,72	0,31	s
24	0,32	0,56	0,24	s
1	0,18	0,31	0,14	s
5	0,46	0,94	0,47	s
20	0,32	0,79	0,47	s
16	0,28	0,87	0,59	s
28	0,31	0,99	0,68	s
31	0,18	0,61	0,42	s
6	0,19	0,78	0,59	s

s = différence significative ; ns = différence non significative

Tableau XII : Effets des traitements sur la hauteur des plantes (cm/plante)

N° lignée	sol acide	sol chaulé	effet chaux	Signification lsd _{0,05} = 2,22
2	16,03	10,37	-5,67	s
29	14,53	12,17	-2,37	s
32	16,53	14,83	-1,7	ns
8	13,00	11,57	-1,43	ns
13	14,67	13,33	-1,33	ns
18	16,67	15,33	-1,33	ns
26	15,00	13,87	-1,13	ns
23	15,00	14,00	-1	ns
7	14,00	13,17	-0,83	ns
14	13,17	12,50	-0,67	ns
4	8,33	7,90	-0,43	ns
30	18,67	18,50	-0,17	ns
9	13,33	13,83	0	ns
15	11,33	11,67	0,33	ns
1	10,50	11,77	1,27	ns
21	14,17	15,50	1,33	ns
28	12,50	13,93	1,43	ns
10	13,00	14,50	1,5	ns
27	13,73	15,50	1,77	ns
3	14,50	16,33	1,83	ns
11	12,00	14,83	2,83	s
22	13,83	16,73	2,9	s
25	11,57	14,67	3,1	s
16	11,67	15,43	3,77	s
12	10,00	14,50	4,5	s
20	10,67	17,50	6,83	s
24	5,83	12,83	7	s
19	9,17	16,67	7,5	s
5	8,27	16,17	7,9	s
6	6,90	15,33	8,43	s
17	8,17	17,00	8,83	s
31	8,67	17,60	8,93	s

s = différence significative ; ns = différence non significative

Tableau XIII : Effets des traitements sur le nombre de feuilles /plante

N° lignée	sol acide	sol chaulé	effet chaux	Signification lsd _{0,05} =0,88
4	2,20	0,47	-1,73	s
7	5,67	2,67	-3,00	s
2	2,25	0,97	-1,28	s
15	2,08	1,33	-0,75	ns
30	3,33	2,73	-0,60	ns
13	2,17	1,93	-0,23	ns
8	4,27	3,83	-0,43	ns
9	3,33	3,13	-0,20	ns
23	4,17	4,00	-0,17	ns
18	5,12	5,00	-0,12	ns
16	2,42	2,50	0,08	ns
14	1,67	1,97	0,30	ns
27	2,25	2,83	0,58	ns
31	1,43	2,10	0,67	ns
17	4,57	5,50	0,93	s
10	3,33	4,50	1,17	s
29	2,03	3,33	1,30	s
11	1,60	2,75	1,15	s
5	4,00	5,50	1,50	s
26	3,12	4,50	1,38	s
22	2,13	4,17	2,03	s
3	2,27	4,53	2,27	s
1	0,73	1,67	0,93	s
32	2,60	6,17	3,57	s
20	2,00	4,97	2,97	s
28	1,53	4,33	2,80	s
24	0,87	2,53	1,67	s
19	1,33	5,20	3,87	s
21	0,87	4,23	3,37	s
6	0,83	4,13	3,30	s

s = différence significative ; ns = différence non significative

Tableau XIV : Effets des traitements sur la surface foliaire (cm²/plante)

N° lignée	sol acide	sol chaulé	effet chaux	Signification lsd _{0,05} =39,53
4	101,00	37,70	-63,3	s
13	170,90	92,60	-78,3	s
2	162,60	105,90	-56,7	s
29	268,70	221,40	-47,3	s
15	149,00	123,50	-25,5	ns
30	200,50	181,60	-18,9	ns
32	262,90	253,80	-9,1	ns
8	212,50	211,20	-1,3	ns
9	146,50	153,30	6,8	ns
18	272,30	299,30	27	ns
14	166,70	183,30	16,6	ns
7	182,90	208,80	25,9	ns
22	220,90	253,60	32,7	ns
3	146,60	185,20	38,6	ns
1	40,40	76,30	35,9	ns
23	236,60	325,50	88,9	s
26	167,40	247,70	80,3	s
10	205,30	304,00	98,7	s
21	109,20	168,60	59,4	s
27	173,00	277,90	104,9	s
11	120,30	204,90	84,6	s
25	134,80	229,90	95,1	s
19	132,00	232,90	100,9	s
12	110,50	212,00	101,5	s
28	136,70	272,90	136,2	s
16	112,90	239,50	126,6	s
5	111,20	269,70	158,5	s
20	87,30	247,60	160,3	s
17	101,40	355,40	254	s
31	49,30	181,00	131,7	s
24	50,20	194,90	144,7	s
6	31,10	250,70	219,6	s

s = différence significative ; ns = différence non significative

Tableau XV : Effets des traitements sur la biomasse racinaire des lignées (g/plante)

N° lignée	sol acide	sol chaulé	effet chaux	Signification lsd _{0,05} = 0,075
4	0,25	0,10	-0,15	s
7	0,59	0,34	-0,25	s
8	0,36	0,25	-0,11	s
27	0,37	0,29	-0,08	s
26	0,24	0,17	-0,08	s
13	0,22	0,18	-0,04	ns
2	0,24	0,20	-0,04	ns
23	0,61	0,54	-0,07	ns
17	0,33	0,29	-0,04	ns
18	0,44	0,40	-0,04	ns
14	0,15	0,14	-0,01	ns
3	0,39	0,37	-0,02	ns
15	0,15	0,15	0,00	ns
25	0,24	0,25	0,01	ns
30	0,24	0,25	0,01	ns
11	0,21	0,22	0,01	ns
9	0,33	0,38	0,05	ns
10	0,34	0,42	0,07	ns
22	0,21	0,26	0,05	ns
19	0,23	0,29	0,06	ns
1	0,15	0,20	0,05	ns
12	0,11	0,18	0,07	ns
5	0,36	0,58	0,22	s
20	0,17	0,30	0,13	s
24	0,18	0,33	0,15	s
21	0,14	0,27	0,13	s
6	0,18	0,36	0,18	s
32	0,31	0,65	0,33	s
16	0,19	0,39	0,20	s
28	0,14	0,37	0,23	s
29	0,19	0,57	0,38	s
31	0,11	0,34	0,23	s

s = différence significative ; ns = différence non significative

Tableau XVI : Effets des traitements sur le volume racinaire des lignées (cm³/plante)

N°lignée	sol acide	sol chaulé	effet chaux	Signification lsd _{0,05} = 1,16
7	5,67	2,67	-3	s
4	2,20	0,47	-1,733	s
2	2,25	0,97	-1,283	s
13	2,17	1,93	-0,234	ns
8	4,27	3,83	-0,434	ns
9	3,33	3,13	-0,2	ns
23	4,17	4,00	-0,167	ns
18	5,12	5,00	-0,117	ns
16	2,42	2,50	0,083	ns
14	1,67	1,97	0,3	ns
17	4,57	5,50	0,933	ns
27	2,25	2,83	0,583	ns
25	2,08	2,67	0,584	ns
12	2,35	3,17	0,817	ns
31	1,43	2,10	0,667	ns
11	1,60	2,75	1,15	ns
5	4,00	5,50	1,5	s
10	3,33	4,50	1,167	s
29	2,03	3,33	1,3	s
26	3,12	4,50	1,383	s
22	2,13	4,17	2,034	s
3	2,27	4,53	2,266	s
1	0,73	1,67	0,934	s
32	2,60	6,17	3,567	s
20	2,00	4,97	2,967	s
28	1,53	4,33	2,8	s
24	0,87	2,53	1,666	s
19	1,33	5,20	3,867	s
21	0,87	4,23	3,366	s
6	0,83	4,13	3,3	s

s = différence significative ; ns = différence non significative

3.1.2 Comportement des lignées QPL

Sur les 300 pots semés avec les graines des 50 lignées QPL (50 lignées x 2 traitements x 3 répétitions) :

- 61% des pots n'ont pas levé en sol acide contre 69 % en sol chaulé ;
- 10 jours après semis, on notait que 12 % des plantules levées sont mortes en sol acide contre 14 % en sol chaulé ;
- Dans les 10 jours qui succédaient, on a enregistré une mortalité de 14 % en sol acide contre 12 % en sol chaulé. L'analyse des résultats vont concerner en définitive 13 lignées sur les 50.

Les résultats de l'analyse de variance (tableau X`II) pour les lignées QPL montrent que des différences hautement significatives ($p=0,001$) existent entre les lignées pour l'ensemble des caractères étudiés. Ils montrent également des différences hautement significatives entre les traitements pour la biomasse aérienne, la hauteur de la plante, le nombre de feuilles et des différences significatives entre les traitements pour la biomasse racinaire. Pour les autres paramètres, il n'existe pas de différences significatives entre les traitements. L'interaction sol-lignée est hautement significative pour tous les paramètres.

Tableau XVII : Résultats de l'analyse de variance pour les lignées QPL

Source de variation	Biomasse aérienne (g/plante)	Biomasse racinaire (g/plante)	Volume racinaire (cm ³ /plante)	Surface foliaire (cm ² /plante)	Hauteur des plantes (cm/plante)	Nombre de feuilles/plante
F"type de sol"	23,45	5,34	1,61	2,66	10,09	7,87
P"type de sol"	0,001	0,025	0,210	0,109	0,003	0,007
F Lignée	210,07	23,75	56,10	28	14,47	9,70
P Lignée	0,001	0,001	0,00	0,001	0,001	0,001
F sol-lignée	44,21	4,62	14,68	6,35	4,16	5,59
P sol-lignée	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Coefficient de variation (%)	8,9	23,5	14,9	22,2	10	12,5

F= F calculé

P= Propabilité

3.1.2.1 Effet du chaulage sur les lignées QPL

On constate que les valeurs obtenues par les lignées sous l'influence du type de sol sont variables suivant les caractères (tableau XVIII).

Une différence très hautement significative est observée au niveau de la biomasse aérienne. La biomasse aérienne la plus importante est celle obtenue après apport de chaux 0,50 g contre 0,45 g en sol acide .

On observe une diminution de la biomasse racinaire ; 0,19 g de matière sèche/plante en sol chaulé contre 0,22 g de matière sèche/plante en sol acide. La différence est significative.

Les volumes racinaires enregistrés en sol acide (2,74 cm³) et en sol chaulé (2,86 cm³) sont pratiquement les mêmes. Aucune différence significative n'est observée.

Pour la surface foliaire, elle reste la même quelque soit le type de sol. Il n'existe pas de différence significative. On a respectivement 139,7 cm² en sol acide et en sol chaulé 151,6 cm².

Une différence hautement significative est obtenue entre la hauteur des plantes en sol acide (12,6 cm) et la hauteur des plants en sol chaulé (13,5 cm).

Le nombre de feuilles par plant enregistré pour le sol acide est identique à celui du sol chaulé : 5 feuilles. La différence est cependant significative au plan statistique.

Tableau XVIII : Comparaison des moyennes des différents caractères en fonction des «types de sol »

Source de variation	Traitements	Biomasse aérienne g/plante	Biomasse racinaire en g/plante	Volume racinaire en cm ³ /plante	Surface foliaire en cm ² /plante	Hauteur des plantes en cm/plante	Nombre de feuilles /plante
Type de sol	Sol acide	0,45 b	0,22a	2,74 a	139,7a	12,6 b	4,6 a
	Sol chaulé	0,50 a	0,19b	2,86a	151,6a	13,5 a	5 b
Signification		THS	S	NS	NS	HS	HS
lsd _{0,05}		0,019	0,02	0,60	14,69	0,19	0,28

THS = Très Hautement Significatif ; HS = Hautement Significatif ; NS = Non Significatif ; S = Significatif .

L'examen du tableau XIX montre qu'en dehors de la variable Biomasse racinaire (-11,6%) qui subit une réduction, les autres variables ont subi une augmentation. Cependant, la variable Biomasse aérienne obtient le pourcentage de l'effet chaux le plus élevé (10,4 %). Pour les autres variables, le pourcentage est compris entre 4 et 8 %.

Tableau XIX : Effet moyen du chaulage sur les caractères agromorphologiques des lignées QPL

Variables	Sol acide	Sol chaulé	Effet du chaulage
Biomasse aérienne (g/plante)	0,45	0,50	10,4%
Biomasse racinaire (g/pot)	0,22	0,19	-11,6%
Volume racinaire (cm ³ /pot)	2,74	2,86	4,3%
Surface foliaire (cm ² /plante)	139,7	151,6	8,5%
Hauteur des plantes (cm/plante)	12,6	13,5	7,1%
Nombre de feuilles/plante	4,6	5	8,7%

3.1.2.2 Variabilité des caractères en fonction des lignées : effet lignée

Les résultats sont consignés dans le tableau XX.

Biomasse aérienne

Elle oscille entre 0,22 g et 1,08 g de matière sèche/plante et on observe une très grande variabilité. La lignée 7 présente une biomasse aérienne qui est significativement supérieure aux autres lignées. Les plus faibles valeurs sont obtenues avec les lignées 2, 4, 5.

Hauteur des plantes

Les lignées 5 et 2 ont les plus faibles hauteurs. Les lignées 9 et 7 produisent les plants de plus grandes taille (15,8 et 16,6 cm).

Nombre de feuilles

La variabilité est tout aussi importante que pour les variables précédentes. Le nombre de feuilles variant de 4 à 7. La lignée 1 possède le plus grand nombre de feuilles (7). Elle est suivie par les lignées dont le nombre de feuilles est égal à 6. C'est le cas de la lignée 7. La plupart des lignées comportent 5 feuilles.

Surface foliaire

La surface foliaire varie de 67,1 cm² à 311,7 cm². La lignée 7 possède le maximum de surface foliaire et la lignée 2 le minimum de surface foliaire. Les lignées 6, 9 et 13 présentent des surfaces foliaires voisines.

Biomasse racinaire

La biomasse racinaire varie entre 0,09 g et 0,40 g de matière sèche/plante. La lignée 7 détient la biomasse la plus élevée. Elle est suivie des lignées 6, 13, 1, 9 avec une biomasse comprise entre 0,28 et 0,33 g. Les valeurs minimales sont obtenues avec les lignées 4, 5, 8.

Volume racinaire

La variabilité est presque aussi importante que celle observée pour la biomasse aérienne. La lignée 7 détient le volume racinaire le plus élevé. Elle est suivie de la lignée 1 (4,38 cm³). Les lignées 11, 10, 12 ont un volume racinaire compris entre 2,07 et 3,42 cm³. Le plus faible volume est obtenu par la lignée 2 (0,97cm³).

Tableau XX. Performance des lignées en fonction des paramètres liés à la partie aérienne (classification par ordre croissant)

N° Lignée	Biomasse aérienne (g/plante)	N° Lignée	Hauteur des plantes (cm/plante)	N° Lignée	Nombre de feuilles /plante	N° Lignée	Surface foliaire (cm ² /plante)
2	0,22	2	10,5	8	3,5	2	67,1
4	0,25	5	10,5	12	4,3	3	73,9
5	0,25	4	10,8	3	4,3	4	93,7
3	0,27	11	11,2	4	4,5	8	99,4
8	0,33	3	11,5	9	4,5	10	11,0
11	0,37	12	12,7	11	4,7	12	114,1
10	0,44	13	13,6	5	4,7	5	119,7
12	0,48	10	14	10	5,0	11	147,8
6	0,52	6	14,1	13	5,0	9	166,6
13	0,52	8	14,2	2	5,0	6	168,4
9	0,66	1	14,4	6	5,0	13	174,3
1	0,80	9	15,8	7	5,5	1	245,8
7	1,08	7	16,6	1	6,8	7	311,7
lsd_{0,05}	=0,04	lsd_{0,05}	=1,52	lsd_{0,05}	=0,7	lsd_{0,05}	=37,46

Tableau XXI : Performance des lignées en fonction des paramètres liés à la partie racinaire (classification par ordre croissant)

N° Lignée	Biomasse racinaire (g/plante)	N° Lignée	Volume racinaire (cm ³ /plante)
2	0,09	2	0,97
4	0,11	3	1,45
5	0,13	4	1,78
8	0,13	5	1,78
2	0,14	12	2,07
3	0,14	13	2,20
11	0,18	8	2,35
10	0,20	10	3,3
6	0,23	11	3,42
9	0,28	9	3,58
1	0,29	6	3,83
13	0,33	1	4,38
7	0,40	7	5,34
lsd_{0,05}	=0,05	lsd_{0,05}	=0,48

3.1.2.3 Interaction sol-lignée : variabilité des effets du sol en fonction de la lignée

Biomasse aérienne

La biomasse aérienne varie de 0,18 à 1,31g/plante en sol acide. En sol chaulé la biomasse aérienne la plus élevée est de 0,89 g/plante. Seules les lignées 1, 6 et 9 voient leur biomasse aérienne augmenter (plus de 0,18 g/plante) et ce, de façon significative. Des différences significatives sont observées au sein des lignées 4, 10, 12, 7, mais elles sont respectivement positives et inférieures à 0,12 g/plante pour les deux premières lignées et sont négatives en sol chaulé pour les lignées 7 et 12. Les six autres lignées présentent des différences non significatives (tableau XXII).

Tableau XXII: Effets des traitements sur la biomasse aérienne des lignées (g/plante).

Lignée	Sol acide	Sol chaulé	Effet de la chaux	Signification lsd _{0,05} =0,06
7	1,31	0,85	-0,47	s
12	0,57	0,40	-0,17	s
5	0,28	0,22	-0,06	ns
13	0,54	0,51	-0,03	ns
11	0,38	0,36	-0,01	ns
2	0,20	0,24	0,04	ns
3	0,25	0,30	0,04	ns
8	0,30	0,35	0,05	ns
10	0,40	0,48	0,08	s
4	0,18	0,31	0,12	s
1	0,71	0,89	0,18	s
6	0,32	0,71	0,38	s
9	0,43	0,88	0,45	s

s = significatif ; ns = non significatif

Hauteur des plantes

La hauteur des plantes varie de 8,7 à 15,8 cm/plante en sol acide et de 10,2 à 17,3 cm/plante en sol chaulé (tableau XXIII). Des différences non significatives sont

enregistrées sur neuf lignées. Toutefois, on observe un effet dépressif de la chaux sur la hauteur des plants sur quatre lignées.

Tableau XXIII : Effets des traitements sur la hauteur des plantes des lignées (cm/plante).

Lignée	Sol acide	Sol chaulé	Effet de la chaux	Signification $lsd_{0,05}=2,15$
12	14,20	11,20	-3,00	s
10	15,00	13,00	-2,00	ns
5	10,70	10,20	-0,50	ns
8	14,40	14,00	-0,40	ns
13	13,60	13,70	0,10	ns
11	11,00	11,30	0,30	ns
4	10,10	11,50	1,40	ns
7	15,80	17,30	1,50	ns
9	14,90	16,70	1,80	ns
3	10,50	12,50	2,00	ns
1	13,00	15,70	2,70	s
2	8,70	12,30	3,60	s
6	11,70	16,50	4,80	s

s = significatif ; ns = non significatif

Nombre de feuilles

Le nombre de feuilles varie peu. En sol acide, le minimum est de 4 feuilles et le maximum de 6 feuilles. A l'opposé, en sol chaulé, il varie de 3 à 8 feuilles. Les augmentations atteignent rarement deux feuilles lorsque l'on passe d'un sol acide à un sol chaulé. Pour ce paramètre, les différences sont non significatives pour sept lignées au total sur les treize (tableau XXIV).

Tableau XXIV : Effets des traitements sur le nombre de feuilles des lignées.

N° Lignée	Sol acide	Sol chaulé	Effet de la chaux	Signification lsd _{0,05} =0,99
12	5,30	3,30	-2,00	s
8	4,00	3,00	-1,00	s
7	5,70	5,30	-0,40	ns
9	4,70	4,30	-0,40	ns
6	5,00	5,00	0,00	ns
13	5,00	5,00	0,00	ns
3	4,00	4,70	0,70	ns
5	4,30	5,00	0,70	ns
11	4,30	5,00	0,70	ns
4	4,00	5,00	1,00	s
1	6,00	7,70	1,70	s
2	4,00	6,00	2,00	s
10	4,00	6,00	2,00	s

ns = non significatif ; s = significatif

Surface foliaire

La surface foliaire varie de 44,8 à 342,6 cm² en sol acide et de 55 à 287,2cm² en sol chaulé. On note des augmentations de surface foliaire variant de 18 à 113 cm² (tableau XXV). Des différences non significatives sont observées sur un total de 7 lignées.

Tableau XXV : Effets des traitements sur la surface foliaire des lignées (cm²/plante).

N° lignée	Sol acide	Sol chaulé	Effet de la chaux	Signification lsd _{0,05} = 52,97
12	173,20	55,00	-118,20	s
7	342,60	280,80	-61,80	s
13	201,10	147,50	-53,60	s
8	109,00	89,70	-19,30	ns
3	76,50	71,20	-5,30	ns
10	111,00	111,00	0,00	ns
11	138,40	157,20	18,80	ns
5	108,00	131,40	23,40	ns
4	79,20	108,20	29,00	ns
2	44,80	89,40	44,60	ns
1	204,40	287,20	82,80	s
6	117,70	219,10	101,40	s
9	109,90	223,30	113,40	s

s = significatif ; ns = non significatif

Biomasse racinaire

En sol acide, la biomasse racinaire varie de 0,10 g à 0,50 g (tableau XXVI). En sol chaulé, elle varie de 0,05 à 0,31 g/pot. Dans la plupart des cas, l'effet de la chaux est non significatif (neuf sur treize).

Tableau XXVI : Effets des traitements sur la biomasse racinaire des lignées (g/plante).

N°Lignée	Sol acide	Sol chaulé	Effet de la chaux	Signification lsd _{0,05} =0,078
7	0,50	0,31	-0,19	s
13	0,40	0,26	-0,15	s
12	0,14	0,05	-0,09	s
2	0,17	0,10	-0,07	ns
5	0,15	0,11	-0,04	ns
11	0,19	0,16	-0,03	ns
10	0,20	0,19	0,01	ns
1	0,29	0,29	0,01	ns
8	0,13	0,14	0,01	ns
4	0,10	0,13	0,03	ns
3	0,12	0,16	0,04	ns
9	0,25	0,30	0,06	ns
6	0,17	0,28	0,11	s

s = significatif ; ns = non significatif

Volume racinaire

Le volume racinaire varie en sol acide de 0,83 à 6 cm³/pot. En sol chaulé, il varie de 1 à 5,17cm³. L'augmentation la plus élevée (3,7cm³) est obtenue avec la lignée 9 en sol chaulé. L'effet de la chaux est négatif pour 8 lignées et positif pour 7 lignées. Des différences non significatives sont obtenues par les lignées 1, 2, 4, 8 (tableau XXVII).

Tableau XXVII : Effets des traitements sur le volume racinaire des lignées (cm³/plante)

N°Lignée	Sol acide	Sol chaulé	effet chaux	signification lsd _{0,05} =0,68
5	2,57	1,00	-1,57	s
7	6,00	4,67	-1,34	s
11	3,83	3,00	-0,83	ns
3	1,83	,07	-0,77	s
8	2,67	2,03	-0,63	ns
4	1,90	1,67	-0,23	ns
1	4,43	4,33	-0,10	ns
12	2,10	2,03	-0,07	ns
2	0,83	1,10	0,27	ns
13	1,73	2,67	0,93	s
6	3,17	4,50	1,33	s
10	2,60	4,00	1,40	s
9	2,00	5,17	3,17	s

s = significatif ; ns = non significatif

3.1.3 Criblage des lignées pour la tolérance à l'acidité

3.1.3.1 Choix des critères de sélection

Plusieurs paramètres ont été mesurés. L'examen des tableaux de corrélation (tableaux XXVIII et XXIX) montre que la biomasse aérienne est corrélée avec la plupart des variables mesurées (Biomasse racinaire, Volume racinaire, Surface foliaire, Nombre de feuilles, Hauteur des plantes). En sol acide par exemple, la plus forte corrélation est obtenue avec la biomasse racinaire ($r = 0,863$). Elle est suivie par la surface foliaire ($r =$

0,825), puis par le volume racinaire ($r = 0,818$). Les corrélations avec le nombre de feuilles ($r=0,496$) et la hauteur des plantes ($r = 0,439$) sont par contre un peu plus faibles. Ce paramètre (Biomasse aérienne) étant relativement facile à mesurer, on peut donc le retenir comme critère d'appréciation du comportement des lignées vis à vis des facteurs étudiés.

Tableau XXVIII : corrélation de la biomasse aérienne avec les autres variables en sol chaulé

	Biomasse aérienne	Biomasse racinaire	Volume racinaire	Surface foliaire	Hauteur des plantes
Biomasse racinaire	0,796				
Volume racinaire	0,707	0,602			
Surface foliaire	0,829	0,556	0,768		
Hauteur des plantes	0,496	0,303	0,602	0,577	
Nombre de feuilles	0,524	0,431	0,462	0,457	0,142

Tableau XXIX : corrélation de la biomasse aérienne avec les autres variables en sol acide

	Biomasse aérienne	Biomasse racinaire	Volume racinaire	Surface foliaire	Hauteur des plantes
Biomasse racinaire	0,863				
Volume racinaire	0,818	0,804			
Surface foliaire	0,825	0,506	0,542		
Hauteur des plantes	0,439	0,342	0,355	0,793	
Nombre de feuilles	0,496	0,425	0,469	0,765	0,793

3.1.3.2 Définition des classes de comportement

Les meilleures lignées sont celles ayant subi le moins de variation possible entre le traitement acide et le traitement chaulé. Ainsi, en fonction du niveau de variation possible, et sur la base des critères retenus, les lignées sont classées en deux groupes : Tolérantes et Sensibles.

Les lignées tolérantes : les valeurs obtenues en sol acide sont supérieures ou égales à celles obtenues en sol chaulé.

Les lignées sensibles : on observe un effet positif significatif de la chaux .

3.1.3.3 Regroupement des lignées Maka

Sur la base des critères retenus plus haut on a obtenu les résultats suivants rassemblés dans le tableau XXX. On peut distinguer deux groupes de lignées.

Les lignées tolérantes :

On peut distinguer dans ce groupe deux sous groupes :

-le premier sous groupe compte les lignées qui manifestent un effet dépressif (significatif ou non significatif) de la chaux sur la biomasse aérienne. Il est constitué de 9 lignées : 2, 4, 7, 8, 30, 13, 26, 23, 15.

-le second sous groupe est constitué de 8 lignées. Les biomasses produites sur les deux types de sol sont identiques.

Les lignées sensibles :

Le deuxième groupe est composé de lignées dites sensibles. Ce groupe comprend un total de 15 lignées à sensibilité variable. En examinant l'effet de la chaux, on peut s'apercevoir qu'il varie de 38 à 310 %. Ce qui traduit une différence de sensibilité vis à vis de l'acidité du sol.

Tableau XXX : Regroupement des lignées Maka

N° Lignée	Sol acide	Sol chaulé	Effet de la chaux (g/plante)	Signification statistique	Effet chaux en %	Groupe
2	0,58	0,20	-0,37	s	-65	tolérante
4	0,31	0,14	-0,17	s	-53	tolérante
7	1,08	0,73	-0,35	s	-32	tolérante
30	0,67	0,51	-0,16	s	-24	tolérante
8	0,75	0,58	-0,17	s	-23	tolérante
13	0,39	0,30	-0,10	ns	-22	tolérante
26	0,58	0,52	-0,07	ns	-11	tolérante
23	1,14	1,04	-0,10	ns	-9	tolérante
15	0,44	0,43	-0,01	ns	-2	tolérante
18	0,78	0,79	0,01	ns	1	tolérante
19	0,61	0,62	0,01	ns	2	tolérante
32	0,78	0,84	0,06	ns	8	tolérante
25	0,50	0,55	0,05	ns	10	tolérante
9	0,51	0,58	0,07	ns	14	tolérante
22	0,54	0,61	0,08	ns	14	tolérante
17	0,64	0,74	0,10	ns	16	tolérante
14	0,37	0,48	0,11	ns	28	tolérante
27	0,42	0,58	0,16	s	38	sensible
12	0,27	0,41	0,14	s	51	sensible
10	0,56	0,86	0,30	s	54	sensible
11	0,34	0,54	0,20	s	58	sensible
3	0,44	0,70	0,26	s	59	sensible
21	0,26	0,42	0,16	s	62	sensible
29	0,41	0,72	0,31	s	76	sensible
24	0,32	0,56	0,24	s	76	sensible
1	0,18	0,31	0,14	s	76	sensible
5	0,46	0,94	0,47	s	103	sensible
20	0,32	0,79	0,47	s	147	sensible
16	0,28	0,87	0,59	s	212	sensible
28	0,31	0,99	0,68	s	220	sensible
31	0,18	0,61	0,42	s	234	sensible
6	0,19	0,78	0,59	s	310	sensible

3.1.3.4 Regroupement des lignées QPL

Le tableau XXXI montre les deux groupes de lignées.

Les lignées tolérantes

-cinq lignées notamment les lignées 7, 12, 5, 13, 11 forment le premier sous groupe.

L'apport de chaux entraîne un effet dépressif sur la biomasse aérienne. La biomasse aérienne produite en sol acide est plus importante.

-le deuxième sous groupe constitué de 3 lignées, à savoir les lignées : 2, 3, 8.

Les lignées dites sensibles

Le deuxième groupe est constitué de 5 lignées dites sensibles à des degrés divers : les lignées 6 et 9 sont plus sensibles que les lignées 1 et 10.

Tableau XXXI : Regroupement des lignées QPL

N° lignée	sol Acide	sol chaulé	effet chaux	signification	effet chaux en %	Groupe
7	1,31	0,85	-0,47	s	-36	tolérante
12	0,57	0,40	-0,17	s	-30	tolérante
5	0,28	0,22	-0,06	ns	-21	tolérante
13	0,54	0,51	-0,03	ns	-6	tolérante
11	0,38	0,36	-0,01	ns	-3	tolérante
8	0,30	0,35	0,05	ns	17	tolérante
3	0,25	0,30	0,04	ns	16	tolérante
2	0,20	0,24	0,04	ns	20	tolérante
10	0,40	0,48	0,08	s	20	sensible
1	0,71	0,89	0,18	s	25	sensible
4	0,18	0,31	0,12	s	67	sensible
9	0,43	0,88	0,45	s	105	sensible
6	0,32	0,71	0,38	s	119	sensible

L'ensemble des résultats obtenus, nous ont permis de faire un classement des lignées en fonction des noms d'origine des lignées (Tableaux XXXII et XXXIII) :

Tableau XXXII : Liste des lignées Maka tolérantes et sensibles.

Lignées tolérantes	Lignées sensibles
10-15-2-2-1-2-1-2-4	1-10-1-1-2-1-2-4-3
10-15-2-2-1-2-1-1	1-10-1-1-2-1-2-4-1
12-10-1-2-1-1-1-2-1-2	10-15-2-2-1-2-1-2-3
51-7-1-4-4-5-1-1-2	10-15-2-2-1-2-1-3-6
51-7-1-5-1-1-1-2	10-15-2-2-1-2-1-1-1
51-7-1-5-4-1-2-4	10-15-2-2-1-2-1-1
51-7-1-4-4-5-1-1-2	12-3-1-2-2-1-1-2
69-7-2-2-1-3-1-6-3-5	12-10-1-2-1-1-1-2-1-1
1-10-1-1-1-2-1-2-4-8	51-7-1-5-4-2-1
1-10-1-1-3-4-3-3-3	51-7-1-5-1-1-1-1
10-15-2-2-1-2-1-3-4	51-7-1-4-4-5-1-1-4-1
12-10-5-2-2-4-1-4-3-7	69-7-2-2-1-2-1-1-1
51-7-1-5-1-1-1-1	69-7-2-2-1-3-1-5-6-1
51-7-1-5-1-1-1-2	69-7-2-2-13-1-5-6-2
69-7-2-2-1-3-1-5-5	72-3-11-1-2-2
69-7-2-2-1-3-1-6-3-1	
69-7-2-2-1-3-6-3-4	

Tableau XXXIII. Liste des lignées QPL tolérantes et sensibles.

Lignées tolérantes	Lignées sensibles
QPL1-2	QPL-1-1
QPL10-2	QPL12
QPL32	QPL22
QPL 22-1	QPL40
QPL 84	QPL34
QPL4	
QPL6-1	
QPL52	

3.2 DISCUSSION

L'essai a été conduit pendant la saison sèche donc à une période peu favorable à la croissance des plantes : forte chaleur, pouvoir évaporant de l'air élevé. Ceci a sans doute affecté les résultats obtenus. Il est probable que certaines lignées soient plus sensibles à l'acidité du sol dès la levée que d'autres. Cependant, s'il est possible que la présence d'une éventuelle toxicité ou d'un pH bas peut empêcher la germination de certaines graines, il est aussi prudent de ne pas attribuer de façon formelle l'échec de la levée à cette hypothèse vu le fait que les pertes semblent avoir la même importance dans les deux types de sol. D'autre part l'absence de levée peut être attribuée à la qualité des graines.

Diverses causes peuvent être à l'origine de la perte des plantes à 10 et 20 jours après semis. Les températures élevées et le pouvoir évaporant important en cette période de l'année pourrait favoriser le dessèchement des plantules dans les deux types de sol. D'une manière générale, la croissance des plantes a été faible. De plus, la présence de l'aluminium échangeable en quantité importante en sol acide peut également être à l'origine de la perte de certaines plantes en cours de végétation. Selon les travaux de Piéri (1989), il est admis qu'au delà d'un taux de saturation en aluminium (TSA) de 30%, un sol est peu propice aux cultures non tolérantes à l'aluminium. En effet l'observation de feuilles rabougries, de chloroses prononcées pendant les 20 premiers jours de développement chez certaines lignées expliquent la forte acidité du sol (pH4,8) et les symptômes qu'entraînent la présence de grande quantité d'aluminium échangeable dans le sol (perturbation de l'alimentation hydrique de la plante d'où le dessèchement des feuilles).

3.2.1 Effet du chaulage sur les différents caractères des lignées

L'analyse de sol montre que la teneur en aluminium total est de 5387 ppm et celle de l'aluminium échangeable de 323,8 ppm. Quant au pH, il est de 4,8. Cette valeur permet de conclure que le sol est très acide. Vilain (1989) explique que le passage de l'aluminium échangeable dans la solution du sol est source d'acidité potentielle.

L'effet "type de sol" est significatif sur l'ensemble des variables analysées. Il se traduit par de meilleurs résultats en sol chaulé. En effet, en sol acide le pH était de 4,8, après amendement avec de la chaux, il est passé à 6,2. Ces résultats montrent que quelque soit la variable retenue, on enregistre un "effet chaux". L'apport de 0,4 g/Kg de sol de chaux apporte au sol essentiellement du calcium et du magnésium. Le calcium ainsi apporté alimente le pool échangeable. Ainsi les quantités de Ca^{++} apportées maintiennent le pH du sol dans les limites favorables à l'activité biologique (Singleton, 1994), à la vie et à la croissance végétale (Young, 1976).

Les faibles valeurs obtenues en sol acide s'expliquent par, le fait que l'acidité influence les caractéristiques physico-chimiques et la composition de la solution du sol et par conséquent la nutrition minérale des plantes. Bado *et al.*, (1997) montrent qu'en sol acide, le pH influence les mécanismes de fixation et d'échange d'éléments nutritifs d'où la tendance qu'a le complexe à se charger de quantité plus importante d'ions H^+ au détriment de cations échangeables.

3.2.2 Variabilité des caractères des lignées

Le comportement des lignées indique l'existence d'une variabilité génétique inter lignées pour les caractères considérés. Les travaux de Foy (1984) et Sanou (1996) ont montré l'existence d'une variabilité génétique des cultivars de maïs. Dans le cas de notre étude, cette variabilité se manifeste pour les caractères liés à la biomasse aérienne et racinaire. En effet, les résultats de l'analyse de variance révèlent que des différences significatives existent entre les lignées pour les paramètres considérés. Ce qui revient à penser à l'existence d'un potentiel propre à chaque lignée.

Nous devons donc admettre qu'une aptitude physiologique de la plante influe sur le comportement vis à vis du sol. Cela laisse penser qu'il doit être possible de sélectionner des lignées relativement tolérantes et assez résistantes au sol acide. Cette étude montre également l'intérêt des géniteurs potentiels de résistance en fonction du sol.

3.2.3 Effet de l'interaction sol-lignée sur les différentes variables

La variabilité de l'influence du type de sol sur les lignées par rapport aux caractères étudiés indique une sensibilité variable à l'acidité du sol. En effet en sol acide, la croissance des plants est non seulement affectée par la toxicité aluminique mais aussi par la faible disponibilité d'éléments essentiels comme P, Ca, Mg qui sont complexés par l'aluminium et par conséquent sont moins disponibles pour être prélevés par les racines.

On peut distinguer parmi les lignées tolérantes deux sous groupes :

- le premier sous groupe est constitué de lignées qui montrent un effet dépressif de la chaux ;
- le deuxième est formé par les lignées dont l'effet de la chaux est nul.

Ceci est en accord avec les travaux de Young (1976) qui a montré qu'il existe des différences de tolérance au sein d'une même espèce ou d'une même variété. Pour Sanchez, (1976) la croissance des différentes espèces en sol acide dépend de leur relative tolérance à un certain niveau d'Al et de Mn et de leur besoin en Ca et Mg. On peut alors penser que certaines espèces possèdent des gènes responsables de leur condition de tolérance ce qui leur permet de s'adapter en sol acide d'où l'effet dépressif observé chez certaines lignées. Selon Granados (1993) les mécanismes impliqués sont encore mal connus. Certains avancent comme hypothèse la différence de morphologie des racines. D'autres chercheurs (Wild, 1988 ; Sanchez, 1976) ont pu établir qu' en sol acide les espèces tolérantes possèdent une certaine capacité d'augmentation de leur pH dans les zones racinaires. De plus l'aluminium dans les racines des plantes tolérantes n'inhibe pas l'absorption d'autres éléments (Ca, Mg, P).

Conclusion et perspectives

Le recours au chaulage pour la résolution des problèmes des sols acides est une solution fort onéreuse et hors de portée de la grande majorité des agriculteurs de nos pays. D'où le recours à la mise au point de cultivars tolérants aux conditions des sols acides.

L'étude de la variabilité de la réponse de quelques lignées de maïs à l'acidité d'un sol sableux de la station expérimentale de Farako Bâ que nous avons menée a permis d'évaluer le comportement de 100 lignées de maïs.

Les résultats obtenus ont montré que la dose de 0,4 g/kg de sol permettait de neutraliser le sol. L'apport de cette dose de chaux suffisait à augmenter les valeurs des différents paramètres aussi bien pour les lignées Maka que pour les lignées QPL. Cependant des différences non significatives sont observées au sein des lignées QPL pour les variables liées à la surface foliaire et au volume racinaire. Les différentes variables étudiées sont fortement corrélées : biomasse aérienne, biomasse racinaire, volume racinaire, et surface foliaire.

L'évaluation des effets de l'acidité sur quelques lignées de maïs étudiées a permis :

- de noter l'existence au sein des lignées testées d'une variabilité génétique pour les différents paramètres mesurés ;
- de classer les 45 lignées pour lesquelles toutes les données sont complètes en deux groupes : 25 lignées (8 lignées QPL et 17 lignées Maka) sont dites **tolérantes** (soit 55,55 % du total) et 20 lignées (5 lignées QPL et 15 lignées Maka) sont dites **sensibles** (soit 44,44 % du total).

En perspectives, au vu de ces résultats préliminaires, il serait nécessaire :

- de reprendre le travail en saison normale de culture et en milieu réel pour confirmer l'ensemble des résultats obtenus et ce, en effectuant au préalable un test de germination des graines.
- de faire une expérimentation spécifique pour les lignées produisant une biomasse aérienne plus élevée en sol acide afin de voir si leur comportement se maintient.
- de prendre en compte d'autres paramètres tels que la morphologie des racines, la longueur des racines, la teneur des plants en éléments minéraux et le rendement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFRIQUE AGRICULTURE, 2000. N°285, p50.

BADO (V), SEDOGO (P.M), CESCAS (M.P), 1997. Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. Cah. agr. Nov-Dec., 1997 ; vol.b, n°6, pp 571-575.

BEAR (F.E), TOTH (S J), 1948. Influence of calcium on availability of other actions. Soil science., N° 65; 69-74p.

BLONDEL (D), 1970. Relation entre le "nanisme jaune" de l'arachide en sol sableux (dior) et le pH ; définition d'un seuil pour l'activité du rhizobium. Agron XXV, 6-7 : 589-595.

BOYER (J), 1978. Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales humides et sub-humides. Initiation. Documentations techniques n° 35. Ed. ORSTOM, 173 p.

BOYER (J), 1982. Les sols ferrallitiques. Tome 10 : facteur de fertilité et utilisation des sols. Coll. Initiation. Documentations techniques, ORSTOM, Paris, 384 p.

CHAMINADE (R), 1965. Bilan de trois années d'expérimentation en petits vases de végétation. Mise au point technique-Résultats. Agron. Trop.,XX, 10 ; 1801-1861.

COPPENET, 1986. Effet de l'acidité sur les plantes

DABIN, 1971. Evolution des engrais phosphatés dans un essai de longue durée. Phosphore et Agriculture, 58 : 1-14.

DIEHL (R), 1975. Agriculture générale. Ingénieur agronome. Edition J.B 10-BALLIERE. Paris VI 1975. 396 p.

- DIEZ, 1980. Effet of different type of clay over dynamic of P in soils. *Agrochemica* 24, pp 353-360.
- DJONDO (M.Y), 1995. Propriété d'échange ionique des sols ferrallitiques argileux de la vallée du plateau de Mbe-Batéke au Congo. Application de la correction de leur acidité. ORSTOM.
- DOMMARGUES (Y), MANGENOT (F), 1970. *Ecologie microbienne du sol*. Masson et C^{ie}, Paris 796p.
- DUCHAUFFOUR (P.H), 1977. *Pédogenèse et classification*. Paris, Mason, Tome I, 477p.
- DUTHIL (J), 1973. *Eléments d'écologie et d'agronomie*. Tome II. Exploitation et amélioration du milieu collectif des ingénieurs des techniques agricoles. Edition J.B Baillièrè- Paris V^{ième} 1973. 262 p
- FALISSE (A), LAMBERT (J), 1994. La fertilisation minérale et organique. In *Agronomie Moderne. Les bases physiologiques et organiques de la multiplication végétative*. 544 p.
- FOY (C), 1984. Physiological Effects of Hygrogen Aluminium, and Manganese. Toxicities in Acid soil. In *soil acidity and liming*. 2nd ed., F. Adams (editor), Am. soc. Agron., Madison, pp 57-97.
- FOY (C), FLEMING (L), 1978. The physiology and plant tolerance to assess available aluminium and manganese in acid soils. *Agron Trop.*, p301-328.
- FOY (C), 1974. Effects of aluminium on plants growth in E. W. Carson (ed) *the plant root and its environment*. pp 601-642.
- GODEFROY (J), 1974. Evolution de la matière organique du sol sous l'influence du bananier et de l'ananas. Relation avec la structure et la capacité d'échange cationique. Thèse docteur ing., 166p.

- GRANADOS (G), PANDEY (S), CEBALLOS (H), 1993. Response to selection for tolerance to acid soils in a tropical maize population. *Crop science* 33: 936-940.
- GUILLEMAN (G.P), 1991. The chemical properties of acid soils with emphasis on soils of the humid tropics. Academic Publishers, p 3-14.
- GROS (A), 1974. Engrais, guide pratique de la fertilisation. Edit. Maison-Rustique, 436p.
- GUINKO (S), 1984. Végétation de la Haute-Volta. Thèse de Doctorat d'état, Université Bordeaux III, 318 p.
- IRAT- Sénégal, 1973. Rapport annuel. pp 31-42.
- KAMBIRE(S.H), 1989. Effet d'un amendement calcique sur les caractéristiques physico-chimique d'un sol ferrugineux tropical soumis au labour et à la culture continue d'arachide. Mémoire DEA, université C.A.D, Dakar, Sénégal, 67p.
- KAMPRATH (E), 1973. Phosphorus . *Agron. Exp. Sta. Tech. Bull* 219. pp 138-161.
- MARCHANT (J.L), BERTHAUD (J), 1997. Le maïs in « L'amélioration des plantes tropicales ». CIRAD-OROSTOM. pp 401-427.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE, 1999. Stratégie Nationale et Plan d'Action de Gestion Intégrée de la Fertilisation des Sols. Edition. Ouagadougou Burkina Faso. IFDC-Afrique, Lomé, Togo. 101p.
- MORANT (P), 1984. Situation géographique de la station de Farako-Bâ.
- OROSTOM, 1979. Série initiat. Doc. Technique (Paris) N° 22, 281p.
- PANDEY (S), CEBALLOS (H), MAGNAVACA (R), 1994. Genetics of tolerance to soil acidity in tropical maize. *Crop Science*, 34 : 1511-1514.
- PEDRO (A), SANCHEZ (A.P), 1976. Properties and management of soils in the Tropics. A wiley-interscience publication john wiley & sons. New-York. Chichester. Brisbane, Toronto, Singapour, 618 p.

PICHOT (J), SEDOGO (M.P), POULAIN (J), ARRIVET (J), 1981. Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumure minérales et organiques. L'Agron Trop., 36: 122-133.

PIERI (C), 1989. Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du sahara. Ministère de la coop. IRAT/CIRAD, 444 p.

PIERI (C), 1976 a. L'acidification d'un sol dior cultivé du du Sénégal et ses conséquences agronomiques. L'Agron Trop 31; N° 3. pp 245-253.

PIERI (C), 1976 b. L'acidification des terres de cultures exondées au Sénégal. L'Agron Trop. 31, N° 4 pp 339-360.

PIERI (C), 1974. Premiers résultats expérimentaux sur la sensibilité de l'arachide à la toxicité aluminique. Agro. Trop. Vol. 29, n° 6-7, pp 685-696.

POULAIN (J.F), 1967. Résultats obtenus avec les engrais et les amendants calciques. Acidification des sols et correction. In colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Ed. IRAT, 1968.

RITCHIE (C), 1990. The chemical behavior of aluminium, hydrogen and manganese in acid soils in soil acidity and plant nutr, p 1-60. Academic press. Ed. Robston.

ROCHE (P), VELLY (J), 1962. Etude de l'évolution des éléments fertilisants apportés sur les principaux types de sols du lac Alaorta. L'Agro-Tropic., XVII, 1 : 841-880.

ROCHE (P), VELLY (J), 1973. acidité du sol et chaulage. L'Agro Trop ., 28, 2 : 123-130.

SANOU (J), 1996. Analyse de la variabilité génétique, phénotypique, génétique et environnementale de la collection testée. INERA, 8p.

SANOU (J), 1993. Choisir sa variété de maïs au Burkina Faso. In programme sorgho-Maïs-Mil. Amélioration variétale du Maïs. Instit. d'ét. et de recherche agri. 29 p.

- SEDOGO (P.M), 1981. Contribution à la valorisation de résidus culturaux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride (matière organique du sol et nutrition azotée des cultures). Thèse de docteur ing ., INPL, Nancy, 1995.
- SEGALEN (P), 1973. L'aluminium dans les sols. ORSTOM, série initiat. Doc. technique (Paris), n° 22, 281 p.
- SIVAKUMAR (M.V.K) et GNOUMOU (F), 1987. Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : le Burkina Faso. ICRISAT, Bulletin d'information N° 23.
- SOLTNER (D), 1976. Les bases de la production végétale. Tome 1. Le sol, 5ème édition. Collection sciences et techniques agricoles, 447 p.
- SPAIII, 1971. El problema de la acidez en suelos de los valanos orientales : posible soluciones. 3 : 206-209.
- TESSIER (D), 2001. L'acidification des sols. Colloque 4-5 avril, INRA-Versailles. Unité de recherches science du sol. Press info. 2p.
- UEXKULL (H,R), MUTTERT (E), 1995. Global extent, development and economic impact of acid soils. Plant and soil, 175 : 1-15.
- VILAIN (M), 1989. La production végétale. La maîtrise technique de la production., volume 2.
- YOUNG (A), 1976. Tropical soils survey. University Press, 1976; first paper back, Ed. 1980 pp 426.
- WILD (A), 1988. Soil Conditions and Plant Growth. Department of soil science. University of Reading. 11th edition. pp 991.

ANNEXE

ANNEXE 1 : Liste des 50 lignées Maka

N° lignée	Nom des lignées	N° lignée	Nom des lignées
1	69-7-2-2-1-2-1-1-1	26	10-15-2-2-1-2-1-3-4
2	1-10-1-1-1-2-1-2-4-8	27	10-15-2-2-1-2-1-3-6
3	1-10-1-1-2-1-2-4-3	28	10-15-2-2-1-2-1-1-1
4	69-7-2-2-1-3-1-5-5	29	10-15-2-2-1-2-1-1
5	69-7-2-2-1-3-1-5-6-1	30	1-10-1-1-3-4-3-3-3
6	69-7-2-2-1-3-1-5-6-2	31	1-10-1-1-2-1-2-4-1
7	69-7-2-2-1-3-1-6-3-1	32	10-15-2-2-1-2-1-1
8	69-7-2-2-1-3-6-3-4	33	51-7-1-5-4-1-1-4
9	69-7-2-2-1-3-1-6-3-5	34	51-7-1-5-4-1-2-2
10	72-3-11-1-2-2	35	51-7-1-5-4-2-3-1
11	51-7-1-5-4-2-1	36	51-7-1-4-4-5-1-1-1-1
12	51-7-1-5-1-1-1-1	37	51-7-1-5-4-2-2
13	51-7-1-5-1-1-1-2	38	51-7-1-4-4-5-1-1-2-2
14	51-7-1-4-4-5-1-1-2	39	51-7-1-4-4-5-1-1-3
15	51-7-1-5-4-1-1	40	69-7-2-2-1-2-2
16	51-7-1-4-4-5-1-1-4-1	41	69-7-2-2-1-3-6-3-4
17	51-7-1-5-1-1-1-2	42	69-7-2-2-1-3-1-6-3-3
18	51-7-1-5-4-1-2-4	43	69-7-2-2-1-3-1-3-2
19	51-7-1-4-4-5-1-1-2	44	69-7-2-2-1-3-1-5-4
20	12-3-1-2-2-1-1-2	45	72-2-3-8-1-5
21	12-10-1-2-1-1-1-2-1-1	46	12-10-5-2-2-4-1-4-3-6
22	12-10-1-2-1-1-12-1-2	47	12-10-5-2-2-4-1-4-1-6
23	12-10-5-2-2-4-1-4-3-7	48	12-3-1-2-2-1-1-1
24	10-15-2-2-1-2-1-2-3	49	10-15-2-2-3-2-5
25	10-15-2-2-1-2-12-4	50	10-15-2-2-1-2-1-3-6

ANNEXE 2 : Liste des 50 lignées QPL avec leur code

N° lignée	Nom de la lignée	N° lignée	Nom de la lignée
1	QPL1-1	26	QPL53
2	QPL1-2	27	QPL54
3	QPL10-2	28	QPL55
4	QPL22	29	QPL57
5	QPL4	30	QPL58
6	QPL12	31	QPL59
7	QPL22-1	32	QPL60
8	QPL32	33	QPL61
9	QPL34	34	QPL65
10	QPL40	35	QPL67
11	QPL52	36	QPL68
12	QPL84	37	QPL69
13	QPL6-1	38	QPL70
14	QPL10-4	39	QPL71
15	QPL10-6	40	QPL72
16	QPL13	41	QPL73
17	QPL15	42	QPL74
18	QPL31	43	QPL75
19	QPL37	44	QPL76
20	QPL41	45	QPL77
21	QPL42	46	QPL78
22	QPL44	47	QPL79
23	QPL45	48	QPL83
24	QPL50	49	QPL85
25	QPL51	50	QPL96

Annexe 3 : Données moyennes des lignées Maka

Code	FM	SM	HP	HIE	FF	V	C	PE
1	60	92	161	97	63	0	0	0.12
2	50	86	140	60	51	0	0	0.7
3	51	87	129	57.8	55	0	0	0.36
4	64	86	121	70	66	0	0	0.06
6	60	94	203	99	61	0	0	1.56
8	55	92	221	116	57	0	0	1028
9	60	90	164	78	61	0	0	0.58
10	63	96	135	65	74	0	0	0.24
11	60	86	95	38	69	0.6	0	0.02
12	57	89	175	91	60	0	0	0.3
14	58	100	215	110	60	0	0	1.4
16	58	92	202	112	61	0.1	0	0.32
17	60	90			61	0	0	
18	60	88	218	112	64	0	0	0.3
19	60	91			62	0	0	0.22
20	56	94	156	86	57	0	0	0.94
21	55	92	163	73	60	0	0	0.4
22	53	92	172	111	56	0	0	0.9
23	57	92			60	0	0	1.4
24	60	96	242	126	61	0	0	1.3
25	60	96	235	132	61	0	0	1.3
26	56	94	200	104	60	0	0	1.2
27	60	94	212	119	61	0	0	1.2
30	60	90	186	92	61	0	0	0.2
31	52	88	160	57.8	55	0	0	0.62
32	63	90	143	98	80	0	0	0.9

Source : SANOU J. (Com. Per.)

ANNEXE 4. Caractéristiques des lignées QPL

N° de lignée	HP	HIE	F> E	NE	RC
1	142,5	62,5	7	1	1
2	170	72	7	1	2
3	80	30	5	1	1
4	70	20	6	1	0
5	87	33	6	1	0
6	126	52	6	1	1
7	90	45	6	1	1
8	114	39	6	1	1
9	86	27	6	1	0
10	186	85	7	1	1
11	102	38	6	1	0
12	105	36	7	1	0
13	74	27	6	1	0
14	107	49	6	1	0
15	126	45	6	1	0
16	109	46	6	1	0
17	74	25	5	1	0
18	161	69	7	1	0
19	112	43	6	1	0
20	173,7	73,7	7	1	1
21	172	74	7	1	1
22	156,2	76,2	6	1	2
23	116,6	43,3	6	1	1
24	107	42	6	1	1
25	132	65	6	1	2
26	89	33	6	1	0
27	93	39	6	1	1
28	72	35	5	1	0
29	105	41	6	1	1
30	164	85	7	1	1
31	134	53	6	1	1
32	131	66	7	1	1
33	158	70	6	1	1
34	143	72	6	1	2
35	135	61	6	1	1
36	140	72	5	1	1
37	124	67	5	1	0
38	140	74	6	1	0
39	138	65	6	1	1
40	45	15	5	1	1
41	136	62	6	1	1
42	160	84	7	1	1
43	163	76	7	1	1
44	121	47	6	1	1
45	121	55	6	1	1
46	129	57	6	1	1
47	89	42	5	1	1
48	50	21,6	5	1	0
49	88,7	38,7	5	1	0
50	101,2	42,5	6	1	1

Source : SANOU J. (Com. Per.)

Abréviation des caractères agromorphologiques des lignées

Code	Définition
FM	Floraison mâle à 50%
SM	Semis maturité
HP	Hauteur de plantes
HIE	Hauteur d'insertion de l'épi
FF	Floraison femelle
V	Verse
C	Casse
PE	Pois épis

ANNEXE 5 : Dispositif expérimental de l'essai en pot

Facteur 1 : type de sol

Facteur 2		Traitement	Sol acide			Sol chaulé		
		Lignée	Rep1	Rep2	Rep3	Rep1	Rep2	Rep3
Facteur 2	Lignée1							
	Lignée 2							
							
							
	Lignée50							

BURKINA FASO

Unité-Progrès-Justice

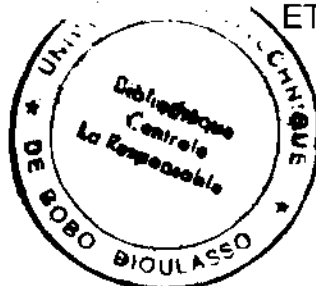
**MINISTERE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE, SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE
BOBO DIOULASSO (UPB)**

**CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET
TECHNOLOGIQUE (CNRST)**

**INSTITUT DU DEVELOPPEMENT
RURAL (IDR)**

**INSTITUT DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE RECHERCHES AGRICOLES
(INERA)**



**STATION DE RECHERCHES
AGRIQUES DE FARAKO-BA**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté en vue de l'obtention du

DIPLOME D'INGENEUR DU DEVELOPPEMENT RURAL

Option : **AGRONOMIE**

THEME :

**VARIABILITE GENETIQUE DE LA TOLERANCE DU MAIS A L'ACIDITE DES
SOLS TROPICAUX**

Directeur de Mémoire : Dr BACYE Bernard

Maître de stage : Dr KAMBIRE. S. Hyacinthe

Octobre 2001

ABESSOLO Mireille Benoîte

*Mem
25
ABE*