

Dm de H. Audemard pour la
Station de Science du Sol

Ecole Nationale Supérieure Agronomique - Montpellier

TA-CE 9

**MEMOIRE DPE
SESSION 1995 AGRICULTURE**

Présenté par G. PIOMBO (CIRAD/GERDAT-URA)

Contraintes présentées par les sols tropicaux acides à l'extension culturale du maïs. Etude de la toxicité aluminique et évaluation de tests de criblage par cultures hydroponiques.

Président du jury : G. DEGERT

**Membres du jury : H. AUDEMARD
C. CROUZET
P. HERRMANN
P. RICARD**

SOMMAIRE

1- INTRODUCTION	6
1-1 Mission du CIRAD	6
1-2 Le contexte agro-économique des PVD	7
1-2-1 Croissance démographique	7
1-2-2 Axe de coopération prioritaire	8
1-3 Présentation du sujet	9
2- LES SOLS TROPICAUX	11
2-1 Situation agronomique	11
2-1-1 Caractéristiques physico-chimiques	11
2-1-2 Le climat	14
2-1-3 L'évolution des sols	15
2-2 Mécanismes d'acidification	16
2-2-1 Acidité naturelle	17
2-2-2 Autres voies d'acidification	18
3- TOXICITE ALUMINIQUE	20
3-1 Géochimie de l'aluminium dans le système sol-solution	20
3-1-1 Les formes de l'aluminium dans le sol	21
3-1-2 L'aluminium en solution	23
3-1-2-1 Les formes libres monomères	24
3-1-2-2 Les formes hydroxylées polymérisées	25
3-1-2-3 Les formes complexes minérales	26
3-1-2-4 Les complexes organiques	26
3-1-3 Quantification des formes	27
3-1-4 Expérimentation	29

3-1-4-1 Simulation GEOCHEM	29
3-1-4-2 Expérimentation sur la cinétique de transfert de l'aluminium	32
3-2 Aspects physiologiques liés à la phytotoxicité	37
3-2-1 Phytotoxicité protonique	37
3-3-2 Phytotoxicité manganique	38
3-3-3 Phytotoxicité aluminique	38
4- CORRECTION DE L'ACIDITE	40
4-1 Effets des amendements	40
4-1-1 La chaux	40
4-1-1-1 Action détoxifiante de la chaux	40
4-1-1-2 Les limites relatives à l'apport de chaux	41
4-1-2 Le gypse	42
4-1-2-1 Action du gypse	42
4-1-2-2 Limites relatives à l'apport de gypse	43
4-1-3 Matière organique	43
4-1-3-1 Amendements organiques	43
4-1-3-2 Engrais verts	45
4-1-4 Phosphates naturels	46
4-1-5 Expérimentation	47
4-2 Limites économiques	53
4-3 Adaptation de la plante au milieu	55
4-4 Intervariabilité dans l'espèce	56
5- EXPLOITATION DE LA VARIABILITE GENETIQUE DU MAIS	58
5-1 Propriétés alimentaires et nutritionnelles du maïs	58
5-2 Développement de la culture du maïs en régions tropicales	60

5-3 Principales améliorations obtenues par la sélection	61
5-4 Cultures au champ	62
5-4-1 Sites expérimentaux en sol acide	62
5-4-2 Résultats variétaux	66
5-5 Mécanismes de la tolérance des plantes à la toxicité	69
6- TESTS DE LABORATOIRE	72
6-1 But	72
6-2 Cultures hydroponiques	73
6-3 Etude de 2 variétés	74
6-4 Description des essais	74
6-4-1 Conditions de cultures	74
6-4-2 Prélèvement des échantillons	76
6-4-3 Détermination de l'aluminium	79
6-4-4 Mesure de l'allongement de la racine	79
6-5 Extraction et dosage des acides organiques	79
6-5-1 Réactifs d'extractions	79
6-5-2 Chromatographie ionique	81
6-6 Résultats	84
6-6-1 Croissance racinaire	84
6-6-2 Concentration en Al dans les parties aériennes et dans les racines	85
6-6-3 Acides organiques	87
6-6-3-1 Analyses statistiques	87
6-6-3-2 Résultats	90
6-6-4 Discussion	90
CONCLUSION	94

BIBLIOGRAPHIE	96
-------------------------	----

LISTE DES ANNEXES

1- Composition minéralogique des argiles - exemple de la kaolinite	107
2- Propriété d'échange des sols : la capacité d'échange cationique	108
3- Modes de cultures en régions tropicales	109
4- Réactions chimiques d'acidification	111
5- Cinétique de l'aluminium - Courbes et tableaux	112
6- Simulation GEOCHEM	119
7- Echange Ca/Al sur le sol d'Ambatolampy corrigé - Tableaux	120
8- Tableau de classification d'espèces végétales en fonction de leur tolérance à l'acidité des sols	121
9- Physiologie et culture du maïs	122
10- Valeur économique du maïs dans les PVD	126
11- Mode de sélection	128
12- Variétés de maïs testées à la Guadeloupe et au Cameroun	130
13- Résultats essais aux champs Cameroun 1994	132
14- Extraction des acides organiques par différentes concentrations d'HCl	134
15- Mode opératoire : extraction des acides organiques	135
16- Modules du système de chromatographie ionique	136
17- Gradient d'élution	137
18- Exemple de chromatogrammes	138

ILLUSTRATIONS

Planche 1 : dispositif de mise en culture	77
Planche 2 : allongement racinaire	78

LISTE DES SIGLES	141
----------------------------	-----

1- INTRODUCTION

1-1 Mission du CIRAD

Les pouvoirs publics, en particulier les ministères de la Coopération et de la Recherche, en créant en 1984 le CIRAD ont formalisé le regroupement d'organismes scientifiques français à vocation tropicale. Ils ont créé ainsi une synergie capable de contribuer efficacement au développement agricole et de subvenir aux besoins agro-alimentaires des pays tropicaux et sub-tropicaux qui souhaitent travailler en collaboration avec le CIRAD.

Le CIRAD participe au développement de ces régions par des recherches, des réalisations expérimentales, des actions de formation et par la diffusion de l'information scientifique et technique.

Les travaux du CIRAD ont une identité forte de recherche agronomique liée au développement économique et social des régions tropicales et sub-tropicales.

Les programmes de recherches sont menés en association avec les centres nationaux de recherche agricole des pays tropicaux, en collaboration avec des organismes nationaux comme l'INRA, l'ORSTOM, le CNRS et à l'échelle européenne ou mondiale dans le cadre de projets associant d'autres organismes internationaux ; CIMMYT, IRRI, FAO, CORAF...etc.

Les chercheurs du CIRAD coopèrent dans une cinquantaine de pays. Ils sont expatriés et confrontés aux réalités du terrain; ils conduisent les programmes de recherches définis par la Direction Scientifique en association avec leurs homologues locaux (partenaires africains, asiatiques ou sud-américains).

Cette politique de coopération doit concilier recherche et développement, c'est-à-dire adapter à la réalité les résultats de la recherche agronomique, aller au-delà de l'étude et proposer des solutions afin de valoriser les cultures d'exportation ou d'aider l'agriculteur d'une exploitation familiale à survivre.

1-2 Le contexte agro-économique des PVD

1-2-1 Croissance démographique

La productivité doit s'intensifier en fonction de l'essor démographique très élevé des pays en voie de développement (3 % par an). La population sub-saharienne a doublé entre 1960 et 1990 (C. PIERI 1989, M.GRIFFON 1990, F.MAKKEN 1993).

Les cultures de rente provoquent des flux de migrations vers les zones cultivées qui évoluent en zones urbaines avec toutes les interactions socio-économiques qui en découlent. L'équilibre alimentaire dans cette situation est fragilisé. Les terres affectées aux cultures vivrières ne sont pas assez nombreuses; seule la productivité peut augmenter, mais cela implique une technologie adaptée, une aide à la fertilisation et une infrastructure efficace. Ces phénomènes vont accélérer le taux d'urbanisation des pays sub-sahariens qui passera entre 1980 et 2010 en moyenne de 35 % à 65 %, avec une pointe à 75 % pour la Côte d'Ivoire.

L'agriculture dans cette région du monde, pour répondre aux défis alimentaires de l'urbanisation, devra produire trois fois plus d'ici 15 ans.

Les surfaces cultivées en millet, sorgho et maïs, principales cultures vivrières, n'ont pas augmenté au cours de ces dernières années; seule la culture du manioc s'étend mais en empiétant sur l'espace traditionnellement réservé au sorgho dont elle occupe 30 % de la surface.

Les solutions préconisées s'appuient sur une augmentation de la productivité des terres fertiles et sur une exploitation des sols marginaux plus pauvres et plus fragiles, en particulier les sols acides, avec comme objectif majeur le maintien de leur fertilité plutôt que l'augmentation des rendements.

Les pays d'Afrique doivent prendre l'exemple de la révolution verte asiatique. "La concentration des efforts publics sur l'agriculture, les activités rurales et la défense de l'environnement poseront les bases du recul de la pauvreté " (J.W. MELLOR 1991).

1-2-2 Axe de coopération prioritaire

Une des priorités majeures de la politique menée par le CIRAD est de contribuer à l'auto-suffisance des exploitations familiales qui sont dominantes dans son champ d'intervention.

Cette auto-suffisance passe par une augmentation de la productivité des terres exploitées.

Cet accroissement peut éviter des déséquilibres socio-économiques et politiques (M.GRIFFON 1990) mais dans de nombreuses situations agronomiques, il peut créer un risque de dégradation de l'environnement.

Les quantités d'intrants ont toujours été très faibles dans les petites exploitations familiales des régions chaudes, moins de 10 kilogrammes à l'hectare en moyenne en 1990, de 50 à 100 fois plus dans les pays industrialisés (H.VAN REULER et W.H. PRINS 1993).

L'explication est simplement économique : 80 % de ces engrais sont importés et seulement le tiers sont financés par l'aide internationale. De plus, il n'existe pas d'infrastructures (crédits, transports) facilitant l'apport d'engrais pour favoriser l'intensification des cultures d'une petite exploitation agricole.

L'augmentation des doses d'intrants azotés provoque aussi une dégradation accélérée des sols cultivés. Les sols partiellement dégradés risquent de s'acidifier et la baisse de leur fertilité ne permettra pas de relever les défis démographiques.

Le sommet de RIO en 1992 a fait prendre conscience de cet état aux responsables de la communauté scientifique; la fragilité de l'environnement incite les organismes à favoriser une exploitation raisonnée et prudente des ressources naturelles des régions tropicales, en particulier pour les petites exploitations familiales où l'auto-suffisance alimentaire durable doit être l'objectif à atteindre. L'agriculteur n'est pas uniquement attaché à la notion de rendement; en Afrique, une récolte de 10 à 20 quintaux à l'hectare, si elle est pérennisée, est un objectif tout à fait acceptable.

C'est pour répondre au mieux à ces différents critères que les organismes scientifiques

internationaux, et le CIRAD en particulier, travaillent à l'adaptation de nouvelles cultures sur des sols acides peu fertiles .

Le maïs est la base de l'alimentation humaine dans plusieurs pays d'Amérique Latine, au Mexique, en Colombie, au Guatemala. C'est aussi une culture principale en Afrique de l'Est et du Sud et en cours d'intensification dans d'autres régions subtropicales.

Aussi, la culture de cette plante dans les sols acides est-elle envisagée à condition d'adapter des variétés tolérantes de l'espèce aux contraintes physico-chimiques du milieu.

Dans ce contexte l'URA, Unité de recherches et d'analyses du GERDAT-CIRAD, collabore à un projet de recherche international financé par la CEE dont le but est de créer des variétés de maïs adaptées aux sols acides tropicaux et sub-tropicaux peu fertiles.

1-3 Présentation du sujet

Le maïs pousse sur 130 millions d'hectares dans le monde et il produit 8 à 10 % de la consommation protéique humaine. La demande annuelle augmente de 4 % en moyenne alors que l'accroissement de la productivité ne dépasse pas 3 %. Les faibles rendements observés dans la majeure partie des cultures des pays en voie de développement sont dus à la faible fertilité associée à l'acidité des sols tropicaux. Pour les 15 millions d'hectares en moyenne cultivés chaque année sur sols acides, les rendements ne sont guère supérieurs à 10 quintaux à l'hectare.

Sur ces sols, les maïs souffrent de la toxicité aluminique et de la déficience en phosphore.

L'objectif premier du contrat cité ci-dessus est de développer des variétés et des hybrides de maïs susceptibles de produire une récolte économiquement viable en s'appuyant sur les ressources naturelles du milieu considéré.

L'étude porte, dans une première étape, principalement sur l'aspect physiologique des mécanismes de tolérance à l'aluminium; les autres facteurs du rendement (phosphore

assimilable, matière organique) seront pris en compte dans une seconde phase.

L'un des axes principaux consiste à développer des cultivars tolérants à l'aluminium et présentant une bonne aptitude à l'absorption du phosphore afin de satisfaire la demande des fermiers et des consommateurs des pays en voie de développement.

Le projet est mené conjointement par des organismes scientifiques, mettant en relation différentes disciplines dont l'interaction permet d'assurer des progrès rapides.

Des chimistes spécialisés en science du sol, des physiologistes, des nutritionnistes, des sélectionneurs, des agronomes et des économistes confrontent leurs travaux et proposent des solutions.

Le but de ce mémoire est, après avoir présenté la situation agronomique des sols acides des régions tropicales africaines, de balayer les différents aspects relatifs à la toxicité aluminique (origine, diagnostic), d'analyser la difficulté à corriger leurs contraintes physico-chimiques par des amendements. De plus, sachant que les travaux des sélectionneurs ont permis de créer des variétés de maïs tolérantes à la toxicité aluminique, à partir de cultures hydroponiques nous allons discriminer deux variétés de maïs par la mesure de leur racine principale, la décroissance racinaire étant le paramètre le plus marquant de la toxicité aluminique. Puis, bien que les mécanismes de détoxifications ne soient pas encore bien connus, nous proposons de vérifier une hypothèse de complexation et de détoxification de l'aluminium par les acides organiques sécrétés par la plante.

Les plantules de maïs sont cultivées sur une période de sept jours. Après extraction, les acides organiques seront déterminés après une mise au point analytique par chromatographie ionique. Ces résultats seront utiles à la compréhension des mécanismes de détoxification de l'aluminium et contribueront à l'évaluation de la qualité des variétés de maïs en vue de leur implantation sur des sols tropicaux acides.

2- LES SOLS TROPICAUX

Les sols acides représentent la moitié des sols arables de la surface de la terre. 43 % des sols tropicaux, de par leur situation climatique et physique, possèdent les caractéristiques des sols acides. Ils représentent 64 % des sols d'Amérique du Sud, 38 % des sols d'Asie, 27 % d'Afrique et 10 % d'Amérique Centrale.

2-1 Situation agronomique

2-1-1 Caractéristiques physico-chimiques

Le cadre de l'étude porte sur l'utilisation raisonnée des sols marginaux africains. Ces sols acides et peu fertiles, très vieux (ère primaire), sont classés dans la nomenclature française, ferrugineux et ferrallitiques (Ph. DUCHAUFOR 1991).

L'altération ferrugineuse peut être considérée comme une étape du processus d'évolution d'ensemble des sols de climats chauds. Ils sont riches en argiles de type kaolinite, ils ne contiennent pas de gibbsite libre et ont une capacité d'échange cationique comprise entre 15 et 25 milliéquivalents pour 100 grammes de sol. Les sols ferrallitiques ont subi une altération complète; leur composition minéralogique se résume à l'existence de quatre composés : quartz, kaolinite, gibbsite et oxydes ferriques. Leur capacité d'échange cationique CEC est faible, inférieure à 5 méq/100g de sol.

Les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux ont généralement une texture sableuse ou sablo-argileuse. Ils ont la particularité de présenter des densités de charges électriques variables en fonction du pH. Ces charges variables apparaissent essentiellement lors de la dissociation plus ou moins complète de la matière organique. La densité de charge varie avec le pH (charges variables), et le pH pour lequel elle est nulle est le point de charge nulle (Zéro Point Charge : ZPC).

Le point de charge nulle peut-être considéré comme le point final d'évolution des sols. D'un

point de vue pratique deux courbes de titration réalisées dans le même électrolyte (exemple KCl) à deux concentrations différentes se coupent à $\text{pH} = \text{ZPC}$.

Le $\text{pH H}_2\text{O}$ des sols tropicaux acides est proche de leur ZPC ce qui entraîne une faible densité de charges. A titre d'illustration, les variations de la CEC, en fonction du pH , sur des sols de ce type sont représentées par la simulation suivante : pour un sol tropical contenant 50% d'argile et 5 % de matière organique, une variation de pH , près du ZPC, ($\text{pH} < 4.5$), produit une faible augmentation de la CEC qui découle des propriétés de surface de la fraction minérale. Par contre, une augmentation du pH au voisinage du pKa de la matière organique ($\text{pH} > 4,5$) entraîne une dissociation de celle-ci et un accroissement élevé de la CEC. L'expérimentation est représentée par le graphique (FALLAVIER 1995 -f-) figure 1.

Les charges variables potentielles d'un sol dépendent de sa composition en minéraux argileux

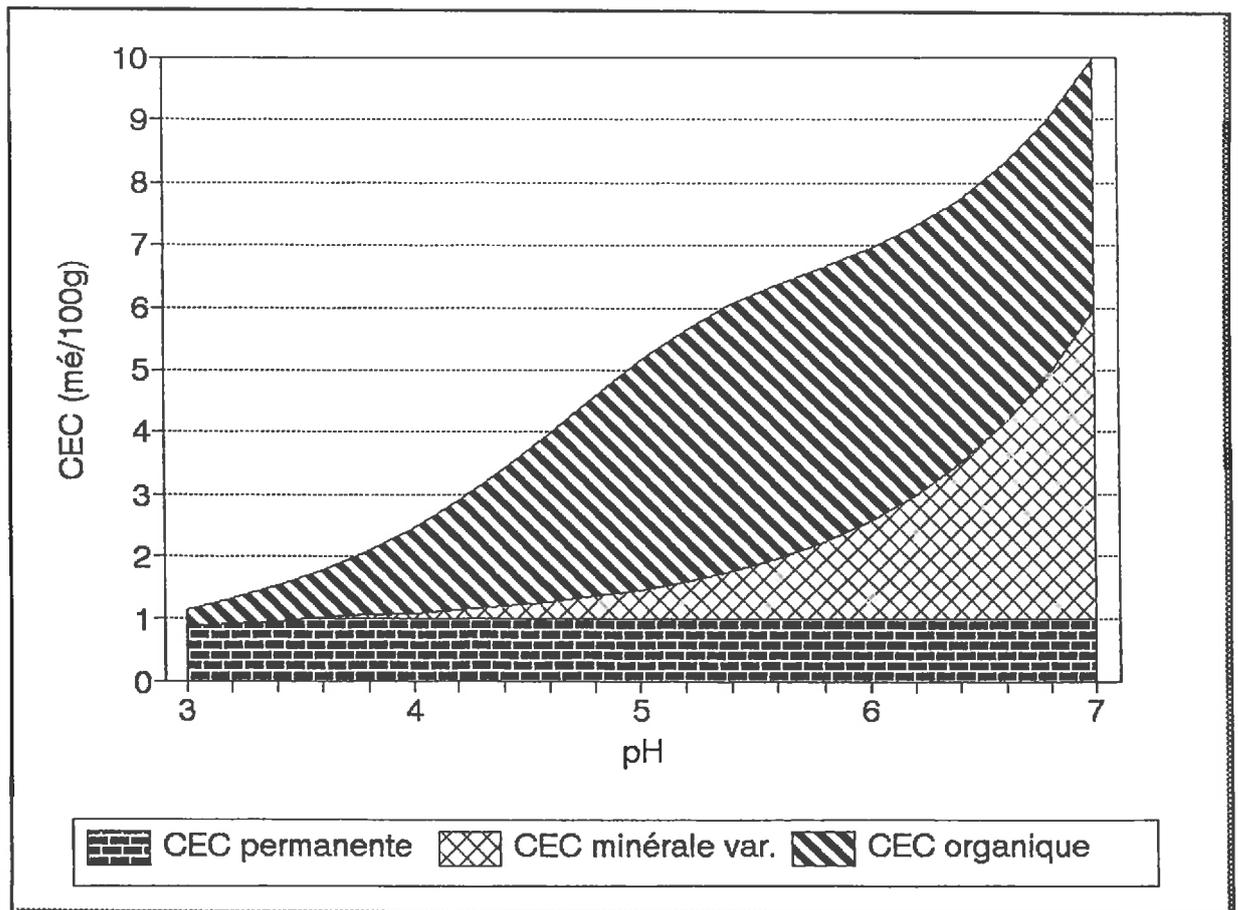


Figure 1 : modélisation : augmentation de la CEC en fonction de l'augmentation de pH dans une situation de sol tropical acide

et de sa teneur en matière organique; la faible CEC de la kaolinite est compensée par la possibilité de création de charges variables. Les autres structures argileuses, inexistantes dans les sols tropicaux acides, n'ont pas cette propriété et ne peuvent augmenter leur CEC (figure 2 d'après YONG et al 1992).

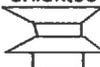
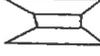
Argiles	Structure	CEC (cmol/kg)	Surface Spécifique (m ² /g)	Origine des charges	Type de charges
kaolinites 	1:1 fortes liaisons-H	5-15	15	charges de bordures hydroxylées	variables et permanentes
illites 	2:1 fortes liaisons-K	25	80	substitutions isomorphiques + qq. charges de bordures	principalement permanentes
chlorites 	2:1 fortes liaisons	10-40	80	substitutions isomorphiques	principalement permanentes
vermiculites 	2:1 faibles liaisons-Mg	100-150	700	substitutions isomorphiques	principalement permanentes
montmorillonites 	2:1 très faibles liaisons	80-100	800	substitutions isomorphiques + qq. charges de bordures	principalement permanentes
		Couche-silicium Couche-aluminium		2:1 = 2 couches silicium pour 1 couche aluminium	

Figure 2 : schématisation de quelques structures argileuses mise en évidence de la faible CEC de la kaolinite et de ses propriétés de charges variables

Ces sols ont d'autres caractéristiques remarquables, en particulier un pH acide de par leur genèse, en raison de la nature de la roche mère, socle granito-gneissique précambrien et de son altération physico-chimique au cours du temps. Les profils des sols tropicaux altérés sont fortement différenciés; ils entraînent une distribution inégale de l'eau et un mauvais drainage. Les effets de ruissellement accentuent les phénomènes d'érosion même pour des pentes faibles

de 1 %. Les cations métalliques, fer et aluminium en particulier, bloquent les ions phosphates et provoquent une carence en phosphore caractéristique de ce type de sol (D.J. GREENLAND 1981).

2-1-2 Le climat

Le soleil proche du zénith provoque un éclairage fort de 11 à 13 heures par jour et des températures de 30 °C en moyenne. Cette photopériode et cette intensité lumineuse maximum limitent la croissance des plantes et réduisent l'activité biologique et chimique des sols.

La zone sub-saharienne peut être divisée en trois zones agroclimatiques :

- ✓ La zone semi-aride : 34 % de la zone sub-tropicale; sols dominants : ferrugineux, sableux.
- ✓ La zone sub-humide : 38 % de la surface; sols ferrugineux et ferrallitiques .
- ✓ La zone humide : 28 % de la surface; avec 60 % de sols ferrallitiques (J. DEKERS 1993).

Ce découpage est fonction de la latitude des différentes zones, mais aussi d'autres facteurs climatiques comme le relief, l'orientation des côtes, la distance à la mer, les courants marins. Les basses pressions se situent près de l'équateur, les pluies sont alors très fréquentes et l'humidité relative de l'air est très élevée. Les hautes pressions se situent vers les latitudes de 30° Nord et Sud (Sahara et Kalahari), les masses d'air remontent (point de départ des alizés), les pluies sont beaucoup plus rares, l'amplitude thermique est élevée. Le front intertropical est le plan de rencontre des masses d'air tropical sec et équatorial humide, il détermine le passage des pluies. Dans les régions équatoriales, les saisons humides sont longues, tandis qu'en zone tropicale, les précipitations sont plus irrégulières, l'amplitude thermique plus forte, les rendements des cultures (en zones agricoles) plus aléatoires.

La zone sub-saharienne a subi une sévère sécheresse de 1968 à 1982; les résultats publiés par

DANCETTE (1984) font ressortir un déficit hydrique de 25 à 30 %. Cette déficience limite la production de la biomasse.

La végétation développe, pour survivre, un système racinaire profond; seules les cultures annuelles à cycle court arrivent à maturité.

Les périodes de sécheresse ont aussi des conséquences négatives sur les sols : les micro-agrégats sous l'horizon de surface du manteau ferrallitique ont été lessivés; les propriétés des sols évoluent alors vers celles de sols ferrugineux altérés (BERTRAND 1986).

2-1-3 L'évolution des sols

Les sols de notre planète évoluent suivant leur génèse, leur situation géographique, les climats et l'utilisation agricole qui en est faite. D'importantes parties du globe sont affectées par la dégradation des sols, en particulier la région tropicale humide est une zone très sensible au

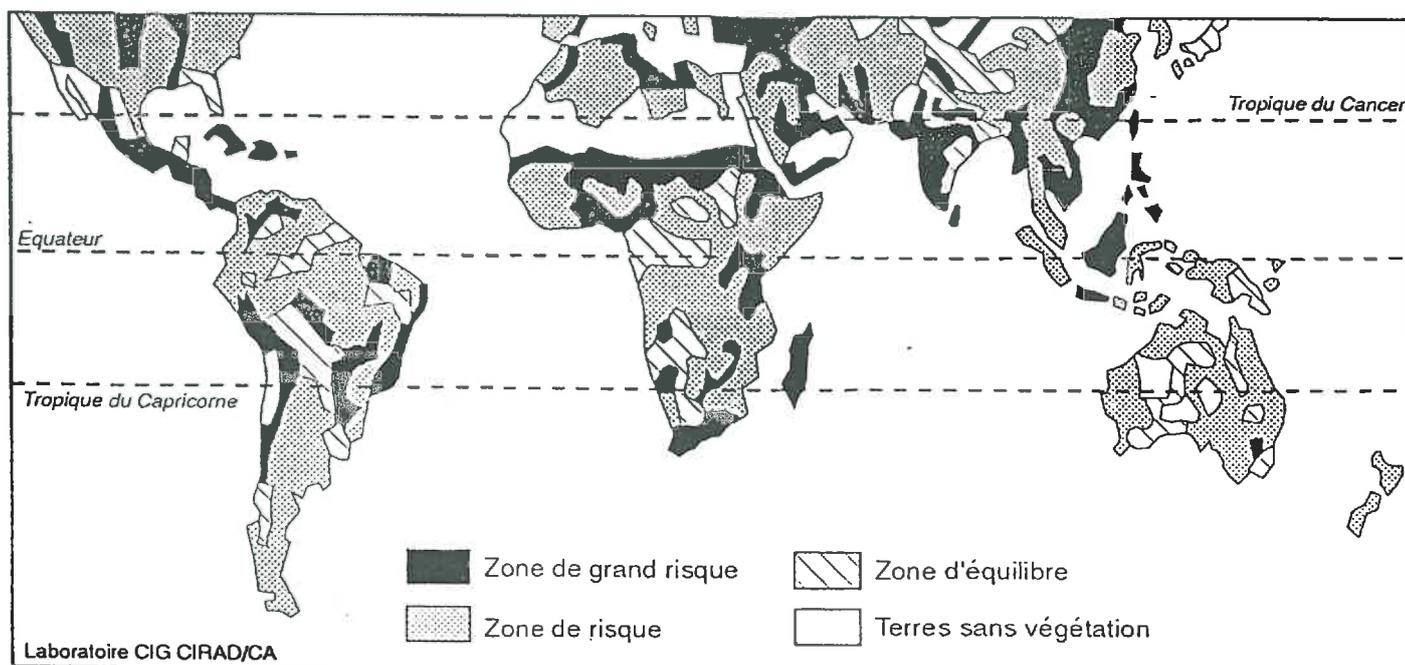


Figure 3 : Dégradation des sols - Principales zones de risque

Les sols tropicaux se dégradent sous l'effet de fortes contraintes climatiques : orages tropicaux, périodes de sécheresse, températures élevées.

La dégradation des alumino-silicates (argiles) en milieu tropical humide est décrite de la manière suivante :

Les composés alumino-silicatés primaires (feldspath) sous l'effet de l'eau, se transforment en minéraux secondaires (kaolinite), eux mêmes étant dégradés jusqu' à l'apparition d'oxydes alumineux (gibbsite), la silice étant lessivée dans les solutions aqueuses. D'une manière générale, nous retrouvons, une altération croissante des sols en fonction de leur situation géographique : les argiles kaoliniques et la gibbsite sont prédominantes dans les zones équatoriales et tropicales humides (G.UEHARA et al 1981).

Dans ces conditions chaudes et humides, la minéralisation de la matière organique s'accélère, les agrégats du complexe argilo-humique sont entraînés par les pluies et laissent apparaître des oxydes de fer formant par endroit des cuirasses et des carapaces.

Les sols lessivés perdent aussi rapidement leurs cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+).

L'érosion naturelle est accélérée quand les sols sont cultivés, en particulier dans les systèmes de culture avec ajout d'intrants azotés. Sous culture, sur ces sols on note un déséquilibre entre apport et exportation de nutriments, ainsi qu'une diminution nette du taux de matière organique (C.PIERI 1989, F. VAN DER POL 1993).

La dégradation naturelle et technologique de ces sols fragiles entraîne une destruction qui s'amplifie avec les phénomènes d'acidification.

2-2 Mécanismes d'acidification

Les mécanismes d'acidification dans les sols sont liés à la production d'ions H^+ . Les protons interviennent dans la solution du sol. Ils sont issus de l'altération des roches par l'hydrolyse (fortement accentuée par des conditions climatiques sévères), et de la respiration de la biomasse

microbienne et racinaire. L'apport d'intrants azotés stimule la nitrification et produit aussi des protons.

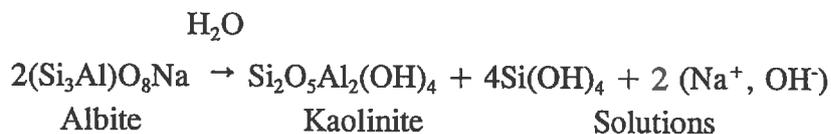
2-2-1 Acidité naturelle

Les protons libérés vont s'échanger avec les cations alcalins et alcalino-terreux du complexe absorbant du sol.

Sur les sols nus, dans les zones tropicales et sub-tropicales, il existe deux voies possibles de production de protons : la respiration microbienne et l'hydrolyse, facilitée par l'humidité du milieu.

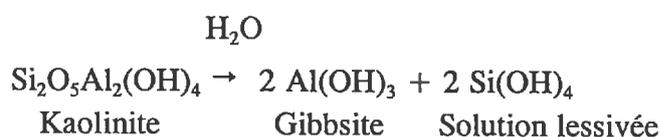
Dans des conditions de sols acides, l'activité microbienne est freinée par l'abaissement du pH; la réaction peut s'arrêter d'elle même, tandis qu'en climat tropical humide, l'excès d'eau ne donne aux réactions d'hydrolyse aucune raison de s'interrompre.

L'hydrolyse des composés alumino-silicatés peut être totale ou partielle. L'hydrolyse partielle peut être schématisée par l'équation suivante, les anions basiques étant rapidement lessivés : (G. PEDRO 1994).



En milieu tropical humide l'hydrolyse est totale.

Les argiles colloïdales secondaires (kaolinite), constituées en grande partie d'aluminium et de silice continuent d'être altérées par les protons qui attaquent leur réseau cristallin. La réaction suivante s'effectue dans son intégralité dans des conditions de pH supérieures à 5.1 :



Dans les sols acides ($\text{pH} < 5.1$), l'aluminium en solution ne précipite pas sous forme de gibbsite mais adopte des formes intermédiaires qui seront détaillées dans le troisième chapitre. L'ion aluminium apparaît alors en position échangeable. Il peut facilement passer en solution (adopter une forme hydratée; $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$) et son hydrolyse, décrite par l'équation simplifiée suivante : (G. CHARLOT 1966), va libérer des protons.



Ce type de réaction va influencer sur le caractère acide du sol. Les quantités importantes d'aluminium disponibles dans les structures colloïdales confèrent au sol un système de pouvoir tampon. Le pouvoir tampon s'explique dans la mesure où les quantités d'aluminium disponibles sont considérées comme une force résistante à toute modification de l'équilibre réactionnel du sol. D'autre part l'humidité du milieu réactionnel déplace la réaction précédente d'une manière irréversible, dans le sens de la production d'ion H^+ , intensifiant l'acidité du sol (F.ADAMS 1984 . I.R.KENNEDY 1992).

2-2-2 Autres voies d'acidification

- ✓ La nitrification des ions ammoniums dans les sols cultivés, accentue son acidité. Les engrais à base d'ammonium (NH_4^+) sont d'autant plus destructurants que le sol est sableux, la capacité d'échange cationique (CEC) faible et l'apport de matière organique inexistant. L'exemple des essais de longue durée montre que les baisses de pH engendrées par la libération des H^+ et des Al^{3+} sont irréversibles, sans correction de l'acidité du sol (J. PICHOT 1981).
- ✓ La respiration microbienne activée par les fortes chaleurs et fortement liée à l'apparition des pluies, favorise la décomposition des résidus végétaux.
- ✓ L'humification génère des acides fulviques et humiques qui vont influencer sur le complexe

d'échange du sol et sa capacité à réguler l'acidité (complexation de l'aluminium).

Le diagnostic agronomique révèle une toxicité chimique relative à l'hydrolyse des composés alumino-silicatés; elle peut être levée après correction de l'acidité du sol. Dans les chapitres suivants, nous allons aborder le problème de l'aluminium dans le sol et de sa toxicité, puis des possibilités de correction de cette toxicité.

3- TOXICITE ALUMINIQUE

La croûte terrestre contient 7.1 % d'aluminium (LINDSAY 1979).

L'aluminium est un des constituants essentiels des argiles (feldspaths, albite, kaolinite, montmorillonite...); les sols dégradés sont riches en oxydes et en hydroxydes d'aluminium comme la gibbsite.

Dans un sol acide, avec un $\text{pH} < 5$, l'aluminium est libéré et alimente la solution du sol. Dans ces conditions, les cultures sont confrontées à la toxicité aluminique (C. FOY 1984).

3-1 Géochimie de l'aluminium dans le système sol-solution

La géochimie de l'aluminium est gouvernée par un grand nombre de mécanismes physico-chimiques : échange, libération, dissolution, complexation, précipitation, schématiquement représentés dans la figure 4 .

La description analytique d'un tel système est complexe; des méthodes globales permettent de quantifier ces différentes formes.

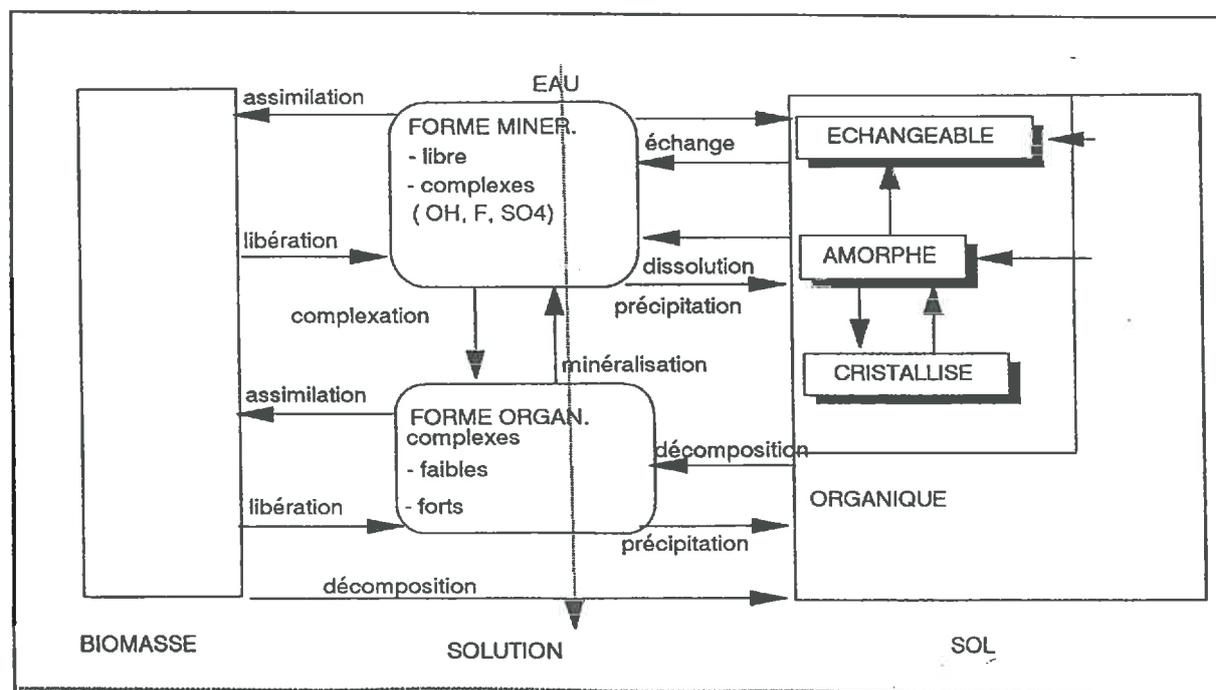


Figure 4 : Schéma des formes de l'aluminium compartimentées dans le système biomasse-solution-sol d'après G. SPOSITO 1989

3-1-1 Les formes de l'aluminium dans le sol

L'aluminium se rencontre grossièrement sous quatre formes principales :

- ✓ à l'intérieur des minéraux cristallisés (argiles, oxydes)
- ✓ sous forme d'oxydes ou d'hydroxydes, cristallisés ou amorphes
- ✓ complexé par la matière organique
- ✓ sous forme ionique, retenu par attraction électrostatique à la surface des colloïdes minéraux et organiques (forme dite échangeable) ou en solution

L'aluminium sous ces différents aspects est quantifié par l'analyse chimique. Quelques méthodes de dosages couramment utilisées dans la pratique sont citées: tableau 1.

Forme Al	Réactif	Référence
Total	Fusion alcaline métaborate de strontium	Bonneau et Souchier, 1994
Cristallisé	dithionite, citrate, bicarbonate de Na (réactif Mehra-Jackson)	Bonneau et Souchier, 1994 5Mehra-Jackson)
Amorphe totale	oxalate d'ammonium pH3 (réactif de Tamm)	Bonneau et Souchier, 1994
Complexé à la matière organique	pyrophosphate de Na 0,1N pH 9,8	Bonneau et Souchier, 1994
Amorphe lié à la matière organique	EDTA 0,2M pH 10	
Libre	acétate d'ammonium pH 4,8	MacLean et al, 1959
Echangeable	cobalthexamine	Fallavier et al, 1985
Solubilisé	eau	Fallavier et al, 1985

Tableau 1 : méthodes de dosages de l'aluminium

La détermination chimique des formes de l'aluminium met en évidence les faibles quantités d'aluminium échangeable et en solution par rapport aux autres formes contenues dans le système sol-solution comme l'illustrent (tableau 2), les concentrations des différentes formes d'aluminium analysées dans dix sols tropicaux acides (FALLAVIER et al. 1985).

Résultats en méq/100g	Total	Oxyde	Lie MO	Amorphes	Amor. Lie MO	Libre	Echangeable	Eau
Rwanda	1347	105	55	26	15	4.51	2.81	0.0970
Equateur	1112	62	71	26	26	4.94	4.46	0.0050
Madagascar 1	694	62	55	15	32	2.00	0.17	0.0190
Madagascar 2	1718	112	129	159	45	4.76	1.09	0.0120
Madagascar 3	1406	25	124	20	19	1.76	1.17	0.0073
Guyane 1	782	147	204	160	142	15.71	1.73	0.0290
Guyane 2	300	31	45	52	35	4.94	1.44	0.0000
Cameroun	2182	99	66	40	39	3.76	0.18	0.0033
Gabon 1	1065	65	75	25	29	5.41	0.67	0.0044
Gabon 2	781	74	51	22	19	4.71	1.37	0.0082
Moyennes	1139	78	87	55	40	5.25	1.51	0.01852

Tableau 2 : concentrations des différentes formes d'Al dans 10 sols tropicaux acides

Dans tous les cas de figure l'aluminium assimilable par les racines des plantes (échangeable et en solution dans l'eau) est en faible quantité par rapport à celui lié à la matière organique.

L'expérimentation démontre que les seuils de toxicité aluminique en solution sont, pour le maïs, compris entre 5 et 10 μ moles/litre soit 0.0015 à 0.003 méq/100g (PINTRO 1995 -a-).

De plus les fractions d'aluminium liées à la matière organique sont, à terme, des sources d'aluminium disponible. Ce potentiel considéré comme inépuisable est déterminant. Son rôle dans le pouvoir tampon des sols augmente la difficulté de réduire leur acidité.

L'aluminium dans le sol n'a pas une distribution toujours très homogène; à titre d'exemple, G. UEHARA et al (1985) ont mesuré le pourcentage de saturation de cet élément sur le complexe d'échange dans l'horizon de surface d'une parcelle de 28 mètres de côté, sur un sol acide situé dans la région de Sitiung (Sumatra). La représentation graphique de ces mesures (figure 5) marque l'hétérogénéité de la distribution de l'aluminium.

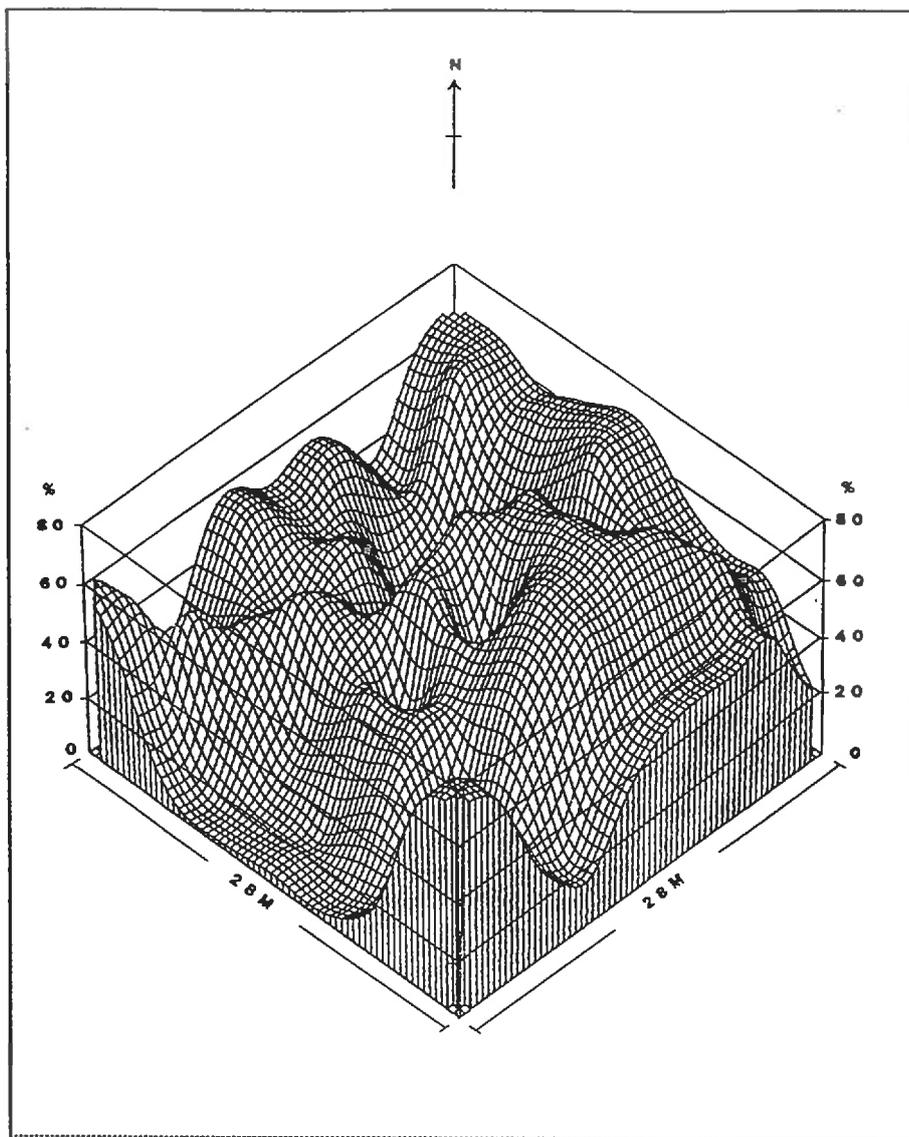


Figure 5 : Distribution de l'aluminium, en % de saturation, sur une parcelle de sol acide (Sumatra). Horizon de surface.

3-1-2 L'aluminium en solution

Les racines prélèvent l'aluminium dans la solution du sol (forme Al-eau) où l'aluminium existe sous différentes formes qu'il est utile de quantifier pour diagnostiquer les toxicités potentielles car chacune d'elles ne présente pas les mêmes risques :

- ✓ La toxicité des formes monomériques a été mise en évidence par de nombreux auteurs (BLAMEY et al 1983, FOY 1984, CAMERON et al 1986). ALVA et al (1986) ont

établi, en milieu hydroponique pour une culture de soja, la toxicité des formes monomériques suivantes: Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^+_2$ et $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$.

- ✓ Les expérimentations menées par BARTLETT et RIEGO (1972), puis par HUE et ses collaborateurs (1986) démontrent la non toxicité des formes d'aluminium liées aux ions phosphates et aux ligands organiques .
- ✓ Les complexes formés par les ions sulfates et fluorures sont présentés comme non toxiques par CAMERON (1986) suite à ses travaux relatifs aux effets de la concentration des composés alumineux en cultures hydroponiques sur du blé. Par contre ces conclusions sont discutées par ALVA (1989), qui constate une diminution de la croissance racinaire de plantules de soja dans des conditions de cultures hydroponiques similaires ($400\mu\text{M}$ de F^-).
- ✓ De nombreux travaux ont été réalisés sur la toxicité des polymères d'aluminium en solution. Leur synthèse a été étudiée par HUANG (1988).

Le plus stable d'entre eux, $\text{AlO}_4\text{Al}_{12}(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}^{7+}$ mis en évidence par KERRIDE dès 1969, confirmé par BARTLETT et RIEGO en 1972 (cités par WAGASUMA et KANEKO 1987) est révélé comme particulièrement toxique comme l'ont montré des expérimentations portant sur l'étude de plantules de maïs (*Zea Mays*) cultivées en solution.

3-1-2-1 Les formes libres monomères

Ce sont les formes $\text{Al}(\text{OH})_x^{(3-x)+}$ (x allant de 0 à 3 en milieu acide).

Dans une solution ne contenant pas de ligands autres que OH^- , la répartition des formes, visualisée par la figure 6, est conditionnée par le pH de la solution.

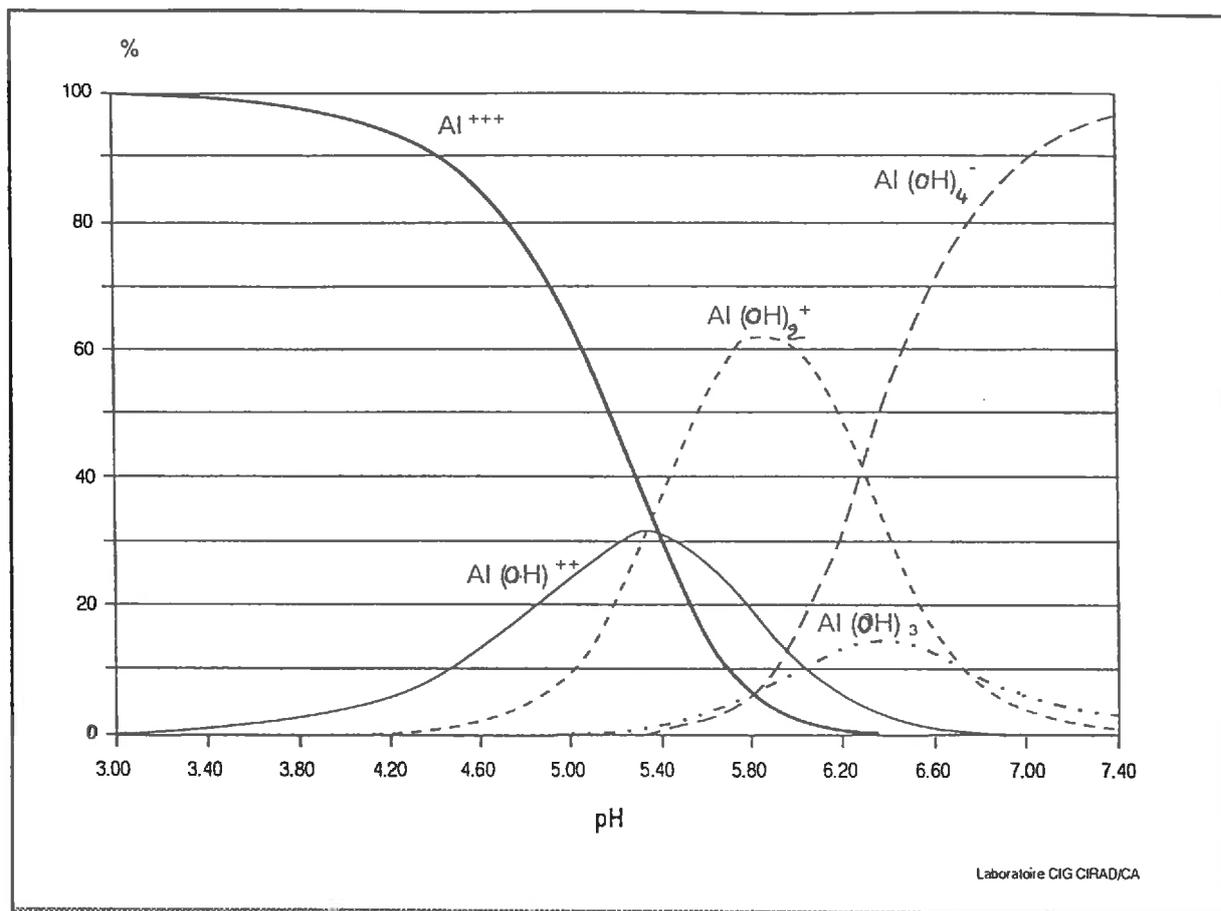


Figure 6 : spéciation de l'ion aluminium en fonction du pH de la solution simulation GEOCHEM (logiciel de calcul SPOSITO et MATTIGOD 1980)

3-1-2-2 Les formes hydroxylées polymérisées

En fait, l'ion aluminium en solution aqueuse est lié à six molécules d'eau, suivant la formule $Al(H_2O)_6^{3+}$ (SPOSITO 1989). De nombreux polymères regroupant plusieurs atomes d'aluminium associés à des hydroxyles et des molécules d'eau peuvent exister (SPOSITO 1989, KINRAIDE 1991), comme le composé le plus stable cité à la page précédente, contenant 13 atomes d'aluminium.

La cinétique de formation de ces polymères est lente (STAI et HSU 1984). Identifiés dans les solutions hydroponiques, leur existence n'a pas été mise en évidence dans des situations réelles de cultures au champ.

3-1-2-3 Les formes complexes minérales

L'ion Al^{3+} dans la solution du sol, se retrouve en présence de ligands minéraux : F^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , SiO_4^{4-} ; leurs interactions en fonction du pH et de la concentration des constituants font apparaître d'autres composants complexes.

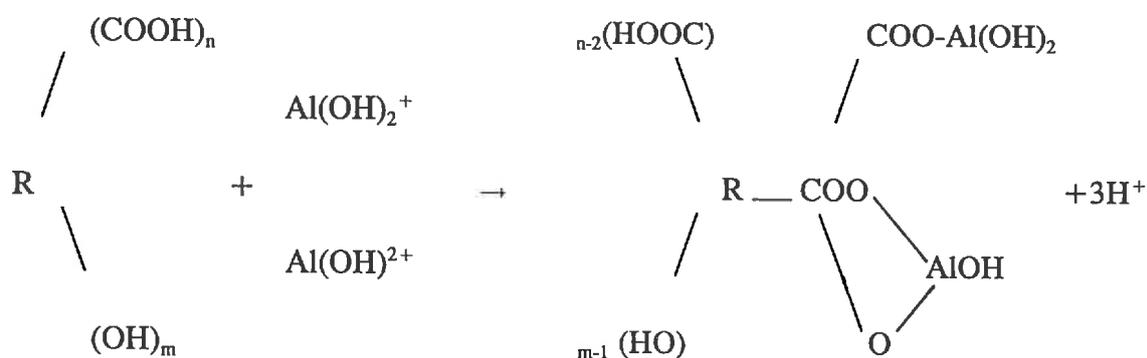
L'ion fluorure, ayant la même charge et le même rayon ionique que l'ion hydroxyle, coordonne l'ion aluminium de la même manière que celui-ci les complexes formés sont les plus stables que l'on puisse trouver dans les eaux naturelles. Les ions sulfate participent à la formation de complexes en présence d' Al^{3+} ; leur distribution est fonction des variations de température et des concentrations du ligand. Les ions phosphates complexent aussi fortement l'ion aluminium. Les nitrates et les chlorures ne forment pas de complexes stables avec l'ion Al^{3+} . Avec SiO_4^{4-} , des réactions lentes se produisent.

3-1-2-4 Les complexes organiques

De nombreuses réactions de complexation de l'Aluminium par des substances organiques se produisent, soit à l'interface sol-solution, soit en solution avec des complexes solubles.

Les substances humiques et surtout fulviques provenant de la minéralisation de la matière organique des sols manifestent une grande affinité pour les ions métalliques et forment des complexes stables.

La réaction générale peut être représentée par le schéma suivant cité par (H. CHAMAYOU et J.P.LEGROS 1989).



Les acides organiques sécrétés par les racines ou disponibles dans la solution du sol, chélatent l'aluminium. Les complexes formés sont d'autant plus stables que leurs constantes de formation sont élevées (HUE et al 1986). La même remarque s'applique pour les acides aminés, en particulier pour les di-acides comme l'acide glutamique et surtout l'acide aspartique :

$\text{HCOOH-CH}_2\text{-CH(NH}_2\text{)-HCOOH}$ dont les constantes de formation déterminent l'apparition de complexes extrêmement stables à l'équilibre.

Après ce bref aperçu sur la diversité et la complexité des formes que peut revêtir l'aluminium, comment analyser celles qui permettront de diagnostiquer un risque de toxicité aluminique pour les plantes ?

Si l'analyse chimique des différentes espèces est aujourd'hui possible directement grâce à des techniques avancées comme la chromatographie ionique ou le couplage masse-chromatographie ou indirectement par le suivi cinétique de la complexation de l'aluminium avec des réactifs colorés, le recours à des logiciels de calculs très élaborés permet également d'aborder cette question.

3-1-3 Quantification des formes - Calculs théoriques

Développé à partir d'une méthode de calcul établie par MOREL et MORGAN (1972), le logiciel de calcul GEOCHEM (SPOSITO et MATTIGOD 1980) permet de déterminer, à partir de la concentration totale de tous les éléments en solution, la composition à l'équilibre des différents composés dans la solution étudiée et peut trouver des applications dans des domaines aussi variés que l'étude des solutions de sols, le suivi de pollutions et du traitement des eaux, la description de solutions nutritives ...

Les équilibres chimiques calculés par GEOCHEM tiennent compte de toutes les réactions possibles de complexation, précipitation, oxydo-réduction entre métaux (y compris H^+) et ligands (y compris OH^-) présents en solution.

Les données thermodynamiques déterminées à 25°C et 1 atm sont stockées dans un fichier autorisant les combinaisons de 36 métaux et 69 ligands. 1452 valeurs de constantes, dont les produits de solubilité et les constantes d'équilibre, sont disponibles.

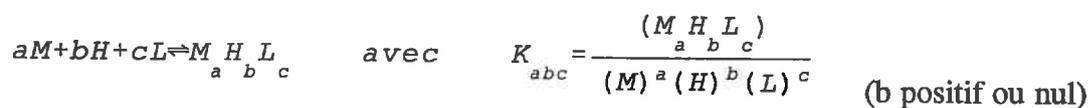
Les corrections dues à la force ionique sont effectuées jusqu'à 3 moles/litre.

Principe de fonctionnement du logiciel GEOCHEM

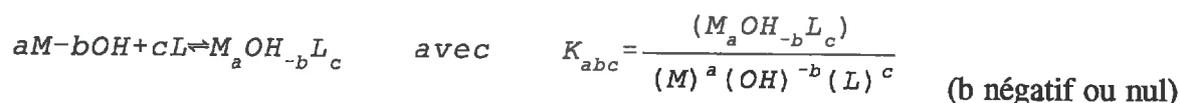
Globalement, les réactions chimiques peuvent s'écrire, pour un métal M et un ligand L :

(avec: a, b, c, nombres respectifs de Moles de M, H, L

et K_{abc} constante de stabilité des complexes)



ou



La conservation des masses sera respectée pour chaque métal et chaque ligand.

Le nombre de moles d'un métal (M) dans une mole de complexe $M_a H_b L_c$ est : $a(M_a H_b L_c)$

$$\text{donc } a(M_a H_b L_c) = a \cdot K_{abc} (M)^a (OH)^{-b} (L)^c$$

La conservation du nombre de MOLES de métal M peut donc s'écrire :

$$M_T = (M) + \text{SOMME} [a \cdot K_{abc} \cdot (M)^a (OH)^{-b} (L)^c]$$

(M) = concentration du métal libre (non lié) en solution

Il en est de même pour les LIGANDS :

$$L_T = (L) + \text{SOMME} [a \cdot K_{abc} \cdot (M)^a (OH)^{-b} (L)^c]$$

(L) = concentration du ligand libre (non lié) en solution

On aboutit à un système d'équations non linéaires dans lequel :

M_T et L_T sont connus (par dosage), H peut être introduit par mesure du pH ou calculé.

La résolution du système d'équations s'effectue par itération. Les résultats à l'équilibre supposé atteint s'affichent sous forme de 4 tableaux présentant :

- ✓ les concentrations et activités des métaux et ligands dans la solution,
- ✓ les concentrations et activités des complexes solubles au pH fixé,
- ✓ la spéciation globale des ions, exprimée en concentration,
- ✓ la distribution en % de la concentration initiale de chacun des éléments sous les formes rencontrées en solution.

Ce logiciel est un outil performant, couramment utilisé au laboratoire pour calculer les formes (spéciation) des différents composés dans une solution étudiée. Au cours de ce travail, GEOCHEM a été utilisé pour déterminer les formes monomériques de l'aluminium en solution en fonction du pH (figure 6) pour simuler des situations théoriques de solutions du sol comprenant de l'aluminium et des composés organiques (figure 7), pour connaître dans la solution nutritive étudiée la répartition des formes de l'aluminium et leur activité.

3-1-4 Expérimentation

3-1-4-1 Simulation GEOCHEM

A l'aide du logiciel GEOCHEM et pour répondre en partie à l'interrogation précédente, nous avons simulé une solution du sol contenant différents composés minéraux et organiques à des concentrations similaires à celles trouvées dans la solution du sol et nous avons recherché les complexes formés entre l'aluminium et les autres composés de la solution. Le but de la simulation est de démontrer que la formation de complexes alumino-organiques est effective. Ces complexes sont réputés non toxiques pour les plantes, leur formation est une source de détoxification qu'il convient d'étudier.

L'étude porte sur une plage de pH comprise entre 3 et 6,5.

Tableau des concentrations:

Fixed pH = 3.000				
	Tot. Conc	-log Tot. Conc	Free Activity	-log Free Activity
Ca	1.995E-03	2.700	1.348E-03	2.870
Al	1.000E-05	5.000	1.244E-08	7.905
SO4	3.388E-04	3.470	1.904E-04	3.720
Cl	2.570E-04	3.590	2.361E-04	3.627
PO4	1.000E-05	5.000	2.219E-19	18.654
Citr	1.000E-05	5.000	3.141E-11	10.503
Oxal	3.981E-05	4.400	1.467E-06	5.834
NO3	2.630E-03	2.580	2.416E-03	2.617
Form	1.000E-04	4.000	1.618E-05	4.791
Malate	3.981E-05	4.400	7.342E-08	7.134
F	3.981E-05	4.400	1.017E-05	4.992
FULV1	3.981E-05	4.400	5.771E-06	5.239
FULV2	3.981E-05	4.400	3.426E-05	4.465

Tableau 3 : concentration des éléments en solution

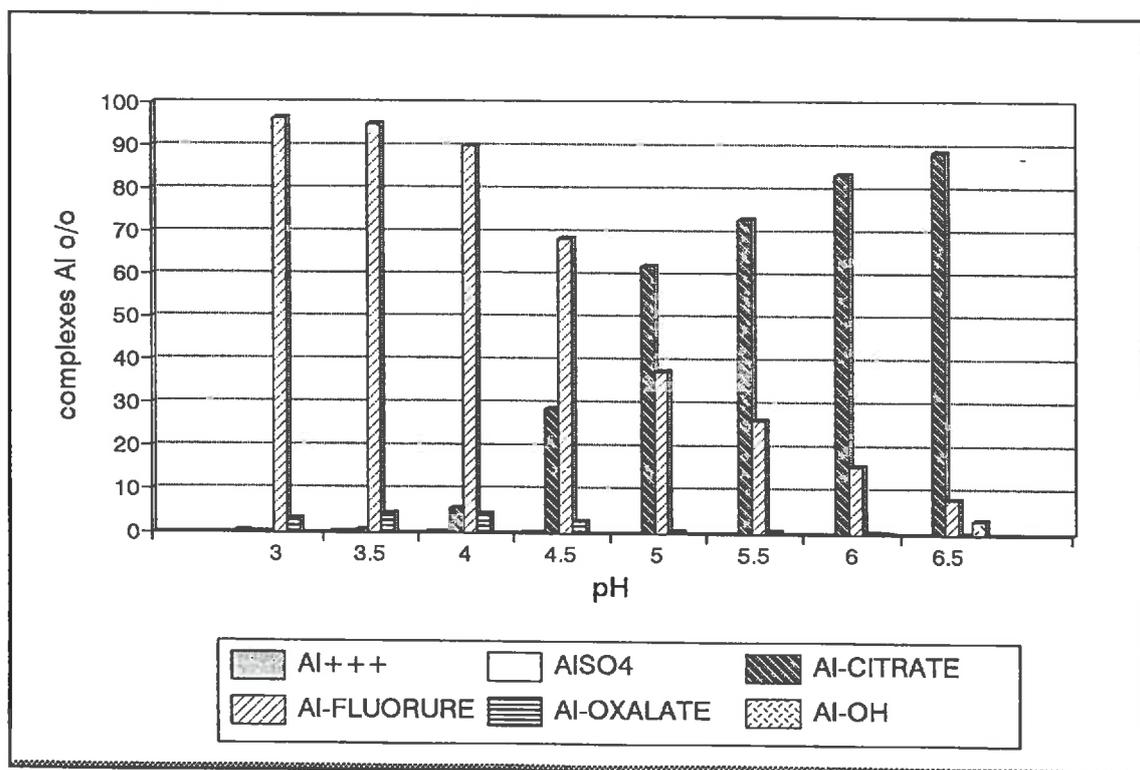


Figure 7 : Evolution de complexes aluminos-organiques et aluminos-minéraux en fonction du pH et de la solution décrite au tableau 3 (simulation GEOCHEM).

Commentaires

Les complexes les plus stables en l'absence de diacides aminés sont ceux formés avec le fluor et le citrate; leurs concentrations respectives évoluent avec le pH. A pH 4.4, que nous retrouverons dans les solutions nutritives, à l'équilibre, les complexes Al-fluor sont les plus importants; ils représentent 68 % des formes d'aluminium dans la solution. Ils sont composés de $\text{Al}(\text{F})^{++}$, $\text{Al}(\text{F})_2^+$, $\text{Al}(\text{F})_3$, $\text{Al}(\text{F}_4)^-$. Les deux premiers complexes cités sont dominants (70% et 23% de l'ensemble). Le complexe formé par le citrate (23% de l'aluminium complexé) est constitué par $\text{Al}(\text{C}_6\text{O}_7\text{H}_7)^{++}$.

Nous constatons que quel que soit le pH, la présence dans le milieu des formes ioniques du fluor ou du citrate suffisent à complexer tout l'aluminium en solution .

En l'absence de fluor dans la solution du sol, les acides citrique et malique sont les principaux complexants de l'aluminium. La forme Al^{+++} toxique, n'existe pas quel que soit le pH.

Nous avons simulé une solution analogue en augmentant la concentration en aluminium. Pour une concentration de $30\mu\text{M}$ soit 3 fois plus que les concentrations repérées en situation réelles étudiées par l'expérimentation précédente, l'ion Al^{+++} existe à l'état libre à pH 3, mais pour seulement 2,93% de sa concentration totale dans la solution, il disparaît progressivement en fonction de l'augmentation du pH (0,59% à pH=4, 0,26% à pH=5).

Pour des concentrations de $100\mu\text{M}$ d'Al dans la solution du sol, Al^{+++} à l'état libre est significatif pour des pH compris entre 3 et 5 (29% à pH=3; 20% à pH=4; 9,5% à pH=5).

La simulation effectuée en ajoutant de l'acide glutamique et de l'acide aspartique à des concentrations comparables à celles des autres composés ($4 \cdot 10^{-5}$ M) provoque l'apparition de nouveaux complexes; seuls ceux formés avec l'acide aspartique sont présents dans le milieu, pour une plage de pH allant de 3 à 6.

En situation réelle, les acides aminés libres (acide glutamique et acide aspartique) dans les racines sont autant sous forme amide, glutamine et asparagine, que sous forme acide. Sous

forme amide, ils n'ont plus de propriétés de complexation. Les acides aminés sont des composés de transition qui participent à la formation des protéines. Leur rôle détoxifiant a été peu étudié.

Notre simulation confirme l'hypothèse selon laquelle l'aluminium en solution peut être complexé par des composés organiques présents dans le milieu. La stabilité des complexes est fonction du pH et des concentrations des différents composés. Ces complexes organiques ne sont pas toxiques pour les plantes; l'apparition dans un milieu, par addition ou excrétion par les racines, d'acides organiques comme l'acide citrique, oxalique ou malique va contribuer à complexer l'aluminium et éviter ainsi l'absorption de cet élément libre par la plante.

3-1-4-2 Expérimentation sur la cinétique de transfert de l'aluminium

Nous avons vu , figure 4, que l'aluminium est localisé, dans le sol et son environnement, dans une série de compartiments plus ou moins reliés entre eux, les plus actifs par rapport aux cultures étant ceux schématisés par : les formes soluble, échangeable et "libre". Mais ces compartiments constituent-ils des réservoirs isolés ou bien sont-ils connectés entre eux et, dans l'affirmative, quelle est l'importance de ces liaisons ?

C'est pour tenter d'ébaucher quelques réponses à ces questions qu'a été entreprise au laboratoire, une étude du suivi dans le temps de l'aluminium dans ces compartiments.

*** Matériels et méthodes**

Deux sols acides en provenance du Brésil (site de Londrina) et du Cameroun (site de Nkoemvone) sont étudiés, dans le cadre du programme STD3 "Adaptation of maize to acid soils of the tropics". Ces sols, si leur caractère acide et toxique se confirme serviront de support pour des cultures expérimentales aux champs.

Leurs principales caractéristiques physico-chimiques sont résumées dans le tableau suivant.

	BRESIL 0-20 cm	BRESIL 20-40 cm	CAMEROUN 0-20 cm
pH eau	5.35	5.20	4.60
pH KCl	4.20	4.10	3.80
Argile %	62	64	52
Mat. Org. %	9.3	5.3	4.1
Ca cmol/kg	2.11	0.45	1.01
Mg "	0.89	0.19	0.65
K "	0.23	0.08	0.18
Na "	0.13	0.13	0.07
Al "	1.80	3.05	1.41
Mn "	0.05	0.01	0.11
H "	0.14	0.14	0.20
CEC "	6.11	4.97	3.27
pH cobalt.	4.16	4.16	4.01
Al eau cmol/kg	0.23	0.08	0.60
AlCaCl ₂	2.17	3.95	1.86
Alac.NH ₄	49.90	38.40	7.20

Tableau 4 : caractères physico-chimiques des sols étudiés

Chaque sol est placé dans 3 colonnes qui diffèrent par la nature du réactif d'extraction sensé s'adresser aux formes d'aluminium étudiées :

- ✓ eau pour l'approche de l'aluminium en solution,
- ✓ CaCl₂ 0.01M pour l'interprétation de l'aluminium échangeable, forme ionisée fixée sur le complexe d'échange, indépendamment de l'origine de ses charges,
- ✓ CH₃COONH₄ 1M à pH=4.8 pour le suivi de l'aluminium communément appelé "libre", constitué essentiellement par des complexes peu stables de ce métal avec la matière organique.

Le dispositif expérimental est constitué d'une colonne de verre de 2.5 centimètres de diamètre, d'une longueur de 40 centimètres. Un système de tuyaux reliés à une pompe péristaltique conditionne la circulation du solvant dans chaque colonne de façon ascendante à un débit de 0.24 millilitres par minute. 50 grammes de sol sont mélangés à 10 grammes de sable de Fontainebleau traité à l'acide chlorhydrique et introduits dans la colonne dont les orifices

contiennent 2 centimètres de coton et de sable permettant une diffusion homogène du solvant.

Les solutions sont recueillies après 1.5, 3, 26, 48, 98, 122, 146, 170, 193 et 260 heures.

L'aluminium est dosé par spectrophotométrie d'émission plasma (Jobin-Yvon.JY50)

Résultats expérimentaux et commentaires

- ✓ Modélisation : La représentation en fonction du temps des quantités cumulées d'Al (Q) extraites par les différents réactifs laisse apparaître qu'elles n'atteignent jamais, quel que soit le sol, une valeur maximale que l'on pourrait supposer si chacun des compartiments étudiés était isolé. Dans ces conditions, la modélisation la plus adéquate pour décrire l'évolution de Q en fonction de t est la formule empirique :

$$Q = a.t^b$$

Q = quantité d'aluminium extrait

a et b = constantes

t = temps en heures

- ✓ Extraction à l'eau : Les mesures sont ajustées à l'équation précédente, les coefficients d'ajustements (R^2) vont de 0.968 à 0.991. On observe que les concentrations d'aluminium sont constantes après 48 heures de lessivage. Les niveaux d'équilibre sont de l'ordre de 10 micromoles par litre dans l'horizon de surface du sol du Brésil. Ces niveaux sont stables au-delà de 300 heures de percolation (figure 8).

La capacité de ces sols acides à redistribuer l'aluminium dans la solution du sol n'est pas surprenante. En effet les quantités d'aluminium dans les différents compartiments du sol en contact avec la solution et mentionnées dans le tableau précédent laissent apparaître des réserves gigantesques.

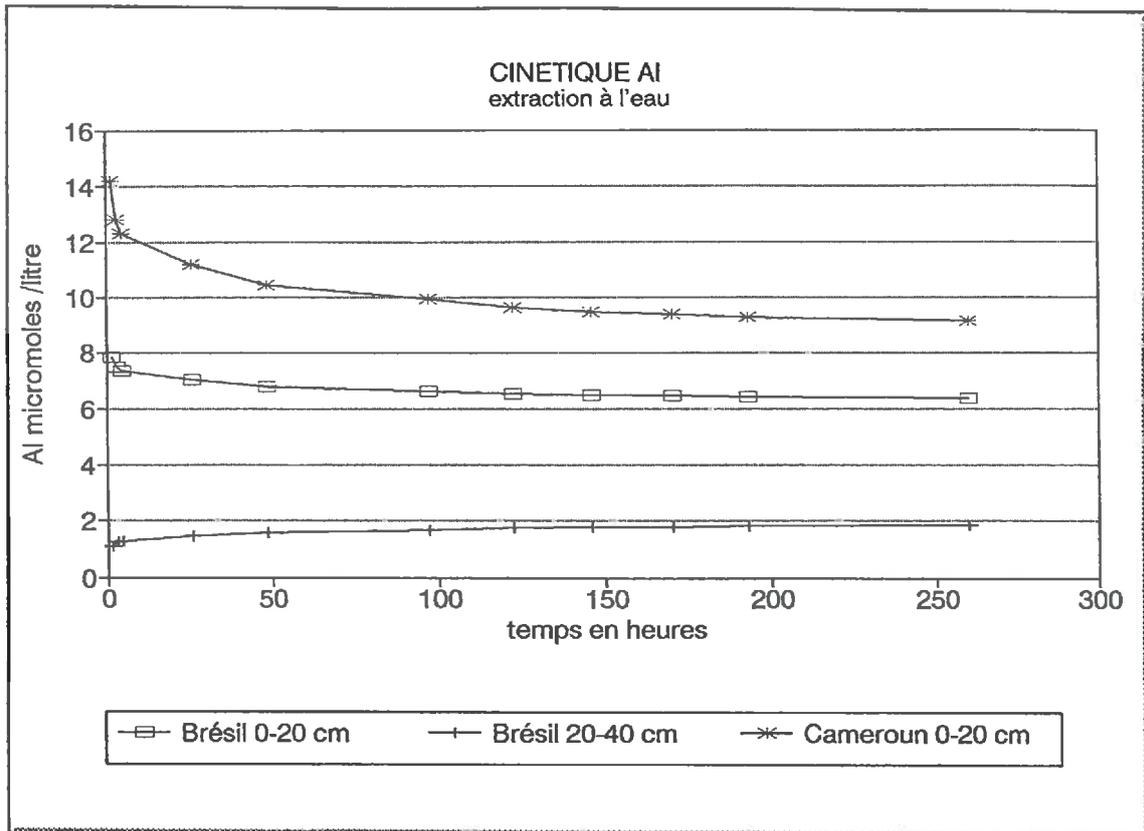


Figure 8 : essai d'épuisement de l'aluminium extrait à l'eau sur des sols acides du Cameroun et du Brésil (2 profondeurs)

- ✓ Extraction au CaCl_2 0.01N: Le modèle appliqué ($Q=a.t^b$) explique correctement l'extraction de l'aluminium (R^2 supérieurs à 0.988). Au cours des premières heures de percolation l'aluminium libéré est cent fois plus concentré que celui contenu dans la solution du sol. Après 48 heures sa concentration tend à se stabiliser, elle est comprise entre 130 et 200 micromoles par litre pour les deux horizons du Brésil, et à 45 micromoles par litre pour le sol du Cameroun. L'horizon de surface du sol du Brésil présente une concentration en aluminium échangeable faible dès la mise en solution, qui reste constante durant toute la durée de la manipulation. Cette particularité peut s'expliquer par la forte teneur en matière organique de cet horizon (9,3%) qui retient énergiquement l'aluminium et ne le libère quantitativement qu'à chaque passage de réactif.

- ✓ Extraction à l'acétate d'ammonium molaire: Les coefficients d'explication sont supérieurs à 0.975 pour les deux horizons du Brésil et de l'ordre de 0.875 pour le sol du Cameroun. Les concentrations d'aluminium extraites sont, dans tous les cas de figures, très élevées , 1000 à 8000 fois plus, suivant les cas, que dans la solution du sol. Elles se stabilisent après plus de 100 heures de percolation. Au terme de l'essai (300 heures) la concentration de l'aluminium extrait va de 35 millimoles par litre (sol du Brésil horizon 20-40 cm) à 800 millimoles par litre (sol du Brésil 0-20 cm).

Les courbes relatives aux extractions CaCl_2 et acétate d'ammonium ainsi que les tableaux de résultats sont annexés au document (ANNEXE 5).

Conclusion

Les résultats de notre étude précisent, que les concentrations d'aluminium dans la solution du sol sont très faibles. Ces valeurs sont cohérentes avec les concentrations en aluminium ajoutées aux solutions nutritives des cultures hydroponiques qui seront utilisées afin de discriminer des variétés de maïs in vitro, dans des situations de toxicité rencontrées dans des sols acides. La tendance de la concentration de l'aluminium en solution à ne jamais diminuer dans le temps laisse supposer que d'autres formes d'aluminium réalimentent ce compartiment et justifie le renouvellement journalier des solutions nutritives des cultures hydroponiques. L'aluminium en solution dans le sol, absorbé par les plantes, précipité ou lessivé, sera remplacé par l'aluminium échangé de la matière organique. Nous avons pu apprécier, au cours de cet essai que les quantités d'aluminium échangé ou complexé par la matière organique sont considérables et semblent inépuisables. Dans ces conditions il sera très difficile d'éliminer l'aluminium des sols acides.

Le rôle de la matière organique est intéressant à souligner; elle complexe fortement

l'aluminium et la stabilité des complexes formés va déterminer la capacité de la matière organique à fonctionner comme un piège pour l'ion aluminium .

3-2 Aspects physiologiques liés à la phytotoxicité

Des oligo-éléments comme le cuivre ou le zinc, en quantités abondantes, suite à des situations particulières relatives à la présence de mines ou par des traitements à répétition s'avèrent toxiques pour les espèces végétales (FOY et CHASSEY 1978).

L'acidification des sols libère des cations acides H^+ , Mn^{++} , Al^{+++} , qui ont souvent des effets toxiques pour les plantes.

3-2-1 Phytotoxicité protonique

Les sols acides tropicaux sont déficients en éléments minéraux majeurs du fait des réactions chimiques d'échanges des ions monovalents par les protons qui présentent plus d'affinité pour les surfaces électro-négatives des minéraux. Les cations basiques essentiels sont alors lessivés. La lixiviation est fortement accentuée par le climat tropical. Les ions métalliques en excès et les protons sont toxiques pour les espèces végétales.

Les protons influent sur la vie biologique des sols en la réduisant, sur la croissance racinaire, sur l'absorption et le transport des éléments nutritifs. L'excès d' H^+ entraîne dans les cellules un échange entre les cations essentiels et les protons. L'expérimentation en solutions nutritives met en évidence que les espèces en milieu acide ont besoin de Ca et d'autres éléments essentiels en quantités de plus en plus importantes en fonction de la diminution du pH (Z. LUND 1970). Les différentes espèces végétales ne réagissent pas de la même façon en situation d'excès protonique dans le milieu. P.H. ISLAM et al (1980), a conduit une étude sur six espèces végétales cultivées en solutions nutritives de pH croissant de 3,5 à 8,5. Le classement proposé en fonction de leur tolérance à l'excès de protons fait ressortir la sensibilité du maïs par rapport

aux autres espèces testées :

gingembre > manioc > tomate > haricot > blé > maïs.

3-3-2 Phytotoxicité manganique

Les ions métalliques rendus assimilables dans les sols acides réagissent négativement sur la croissance des plantes.

La disponibilité du manganèse pour les plantes est fonction des conditions d'oxydo-réduction du milieu.

L'assimilation du manganèse n'est possible que dans ses formes les plus réduites (Mn^{++} et Mn^{+++}). L'absorption en terre acide, à partir de 100 mg de manganèse par kilo de sol, provoque une toxicité facilement identifiable par l'analyse des parties aériennes (M. COPPENET et C. JUSTE 1994).

L'excès de manganèse réduit l'activité des enzymes, des hormones et de la respiration dans les plantes (C.D. FOY 1984).

Mais la toxicité la plus importante pour les végétaux dans les sols acides est celle provoquée par l'ion Al^{+++} constituant majeur dans les sols ferrallitiques (HUANG. 1988).

3-3-3 Phytotoxicité aluminique

La première expression physiologique de la toxicité aluminique est la réduction du développement racinaire de la jeune plantule. Les racines restent courtes, friables, épaisses et peu nombreuses (FOY et CHASSEY 1978). L'apex et les racines secondaires sont endommagés, les poils d'absorption sont fortement réduits. Les parois cellulaires et le plasmalemmes régulent, en fonction de caractéristiques propres à l'espèce considérée, la perméabilité à l'aluminium. L'échange est initié entre l'aluminium et les cations basiques en particulier avec le potassium, ce qui entraîne une dépense énergétique préjudiciable à la

croissance de la plante.

L'aluminium provoque une inhibition des divisions cellulaires méristématiques. Les perturbations métaboliques entraînées par les carences en cytokinines développent des nécroses cellulaires (PAVAN 1982, BENNET 1985, ALVA 1986, KINRAIDE 1991, cités par PINTRO 1995).

L'aluminium en solution favorise la formation de callose (1,3BD glucan) dans l'apoplasme de la cellule (W.J. HORST et al 1982, A.H. WISSEMEIER et al 1993, K. SCHREINER et al 1994, G. ZHANG et al 1994).

Les faibles quantités de phosphore assimilable dues à la formation de complexes avec l'aluminium conduisent à des carences visibles sur les parties aériennes des plantes: feuilles plus petites, colorées en violet foncé, enroulées et abscision précoce du pétiole (BECQUER 1991).

En règle générale pour les plantes cultivées, l'accumulation de l'aluminium se fait au niveau des racines. Il est peu transporté dans les parties aériennes contrairement aux espèces naturelles où l'on retrouve des quantités importantes d'aluminium dans les feuilles (FOY 1984).

Pour éliminer la toxicité aluminique, les pratiques d'amendements sont largement utilisées. Dans le chapitre suivant nous abordons les différents types d'amendements, correcteurs d'acidité, et nous analysons leurs propriétés et leurs limites.

4- CORRECTION DE L'ACIDITE

4-1 Effets des amendements

Les agronomes et les agriculteurs ont de tous temps corrigé l'acidité des sols en incorporant dans l'horizon de surface des composés minéraux ou organiques. Ces pratiques culturales contribuent à diminuer la toxicité aluminique des sols acides.

Les amendements les plus couramment utilisés sont la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), le carbonate de calcium (CaCO_3), la dolomie ($\text{MgCO}_3, \text{CaCO}_3$), le gypse (CaSO_4) et la matière organique (fumier, résidus de récoltes, composts).

4-1-1 La chaux

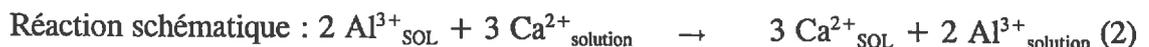
4-1-1-1 Action détoxifiante de la chaux ou du carbonate de calcium

L'apport de chaux ou de carbonate de calcium élimine l'aluminium par précipitation. L'aluminium retenu sur le complexe absorbant sous la forme de Al^{3+} , toxique, s'échange avec le calcium en excès et se transforme en une forme solide et non toxique, $\text{Al}(\text{OH})_3$, à condition que le pH augmente jusqu'à être supérieur à 5,1 .

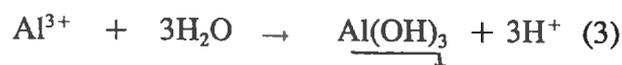
Les réactions mises en jeu lors du chaulage s'effectuent en plusieurs étapes :



✓ Echange entre le calcium en solution et l'Al échangeable :



✓ L'ion aluminium libéré en solution est hydraté, puis hydrolysé. Il précipite sous forme $\text{Al}(\text{OH})_3$ si le pH, dont l'augmentation est engendrée par la réaction (1), dépasse la valeur 5,1 :



De nombreux auteurs font référence à cette pratique culturale.

GODEFROY et DORMOY (1990), sur sols acides de Martinique, préconise l'apport de 7.7 tonnes/hectare de CaO sur 40 centimètres de profondeur pour accroître le pH de 4.2 à 5.2 .

PIERI (1989) démontre en se basant sur des essais de longue durée (20 ans) sur des parcelles de stations agronomiques du CIRAD-CA que la pratique d'un chaulage périodique neutralise les pertes de rendements provoquées par l'acidification des sols.

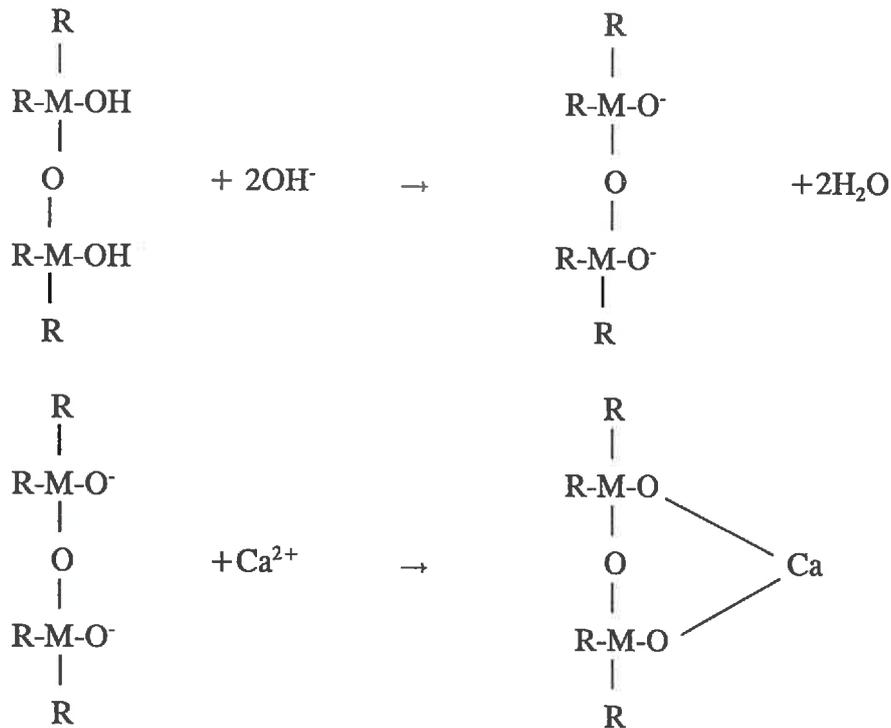
SUMNER et CARTER (1988) note que sur sol acide, pour une culture de luzerne, un chaulage profond permet une prolifération racinaire permettant à la plante de résister à un stress hydrique.

KAMPRATH (1984) précise l'augmentation des taux de rendements de 6 à 56 % de céréales et de légumineuses cultivées sur sols acides après apport de CaO de 2.3 à 5.1 tonnes/hectare. Le chaulage entraîne une modification bénéfique des caractéristiques physico-chimiques du sol. Les ions Ca^{++} , fixés sur le complexe d'échange, peuvent facilement être absorbés par la plante. Il contribue également à lever l'inhibition de l'absorption du calcium subie par les plantes en condition de sol acide.

4-1-1-2 Les limites relatives à l'apport de chaux

La présence de charges variables dans le sol, essentiellement imputables à la matière organique, peut cependant détourner le chaulage de son objectif initial, à savoir le remplacement de l'aluminium sur le complexe d'échange par le calcium, et sa passivation par augmentation du pH en solution.

La matière organique se comporte en effet comme un acide faible dont la dissociation augmente avec le pH (réaction page précédente), entraînant l'apparition de charges négatives responsables d' une augmentation de la CEC : le calcium apporté est alors essentiellement utilisé pour neutraliser les charges ainsi créées comme le précisent les réactions ci-après, ce qui diminue



son efficacité dans la lutte contre l'acidité.

De nombreux exemples mettant en évidence ces observations sur des sols acides de différentes provenances (Cameroun, Brésil) peuvent être cités. De plus la faible solubilité du CaCO_3 limite son action au voisinage immédiat des points d'apport et notamment à l'horizon de surface.

4-1-2 Le gypse

4-1-2-1 Action du gypse

L'utilisation de ce composé minéral ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est une autre forme d'amendement. Ce produit, intervient à la fois par son action cationnique (échange aluminium-calcium) mais aussi par son anion associé SO_4^{2-} qui forme avec l'aluminium un complexe AlSO_4^+ , que la plupart des auteurs considèrent comme non toxique. Beaucoup plus facilement lessivé que les hydroxydes d'aluminium, il pénètre dans les couches du sol jusqu'à un mètre de profondeur. Les calculs des bilans ioniques, effectués avec GEOCHEM dans ce cas de figure (apport de

gypse), suggèrent que l'aluminium échangé et non lessivé se trouve sous la forme solide insoluble $\text{Al}(\text{SO}_4)\text{OH}$ (FALLAVIER et BABRE 1990).

Alors que l'effet sur le pH est insignifiant, la fixation des ions SO_4^{2-} contribue à augmenter la capacité d'échange du sol.

Au champ Mc LAY (1994) note, pour un essai sur sol sableux acide d'Australie pour une culture de blé, une nette amélioration des rendements : 45 % avec un apport de gypse de 3 tonnes par hectare et 77 % avec un ajout combiné de gypse et de chaux.

4-1-2-2 Limites relatives à l'apport de gypse

Dans les régions tropicales humides, l'efficacité des amendements est fortement atténuée par les conditions climatiques. Les fortes pluies entraînent la lixiviation rapide des intrants alcalins. L'apport de calcium par le gypse, dont l'effet sur l'évacuation de l'aluminium ne se cantonne pas qu'aux horizons de surface, entraîne un lessivage important des bases échangeables K^+ et Mg^{++} et ne permet pas une remontée significative du pH.

4-1-3 Matière organique

4-1-3-1 Amendements organiques

Les amendements organiques provoquent en premier lieu une amélioration très sensible du complexe en augmentant sa capacité d'échange. Les acides humiques ou fulviques minéralisés se fixent sur les argiles par l'intermédiaire de cations échangeables, ou de métaux (M), par des liaisons hydrogène avec l'eau d'hydratation des argiles et par des liaisons hydrogène avec la surface des argiles comme le schématise le dessin de la figure 9. A pH acide, les acides fulviques sont fixés, sous formes d'anions, sur les bordures aluminiques (THENG, STEVENSON cité par H. CHAMAYOU J.P. LEGROS, 1989). La fixation de ces deux familles d'acides contribue à développer des charges variables sur le complexe d'échange.

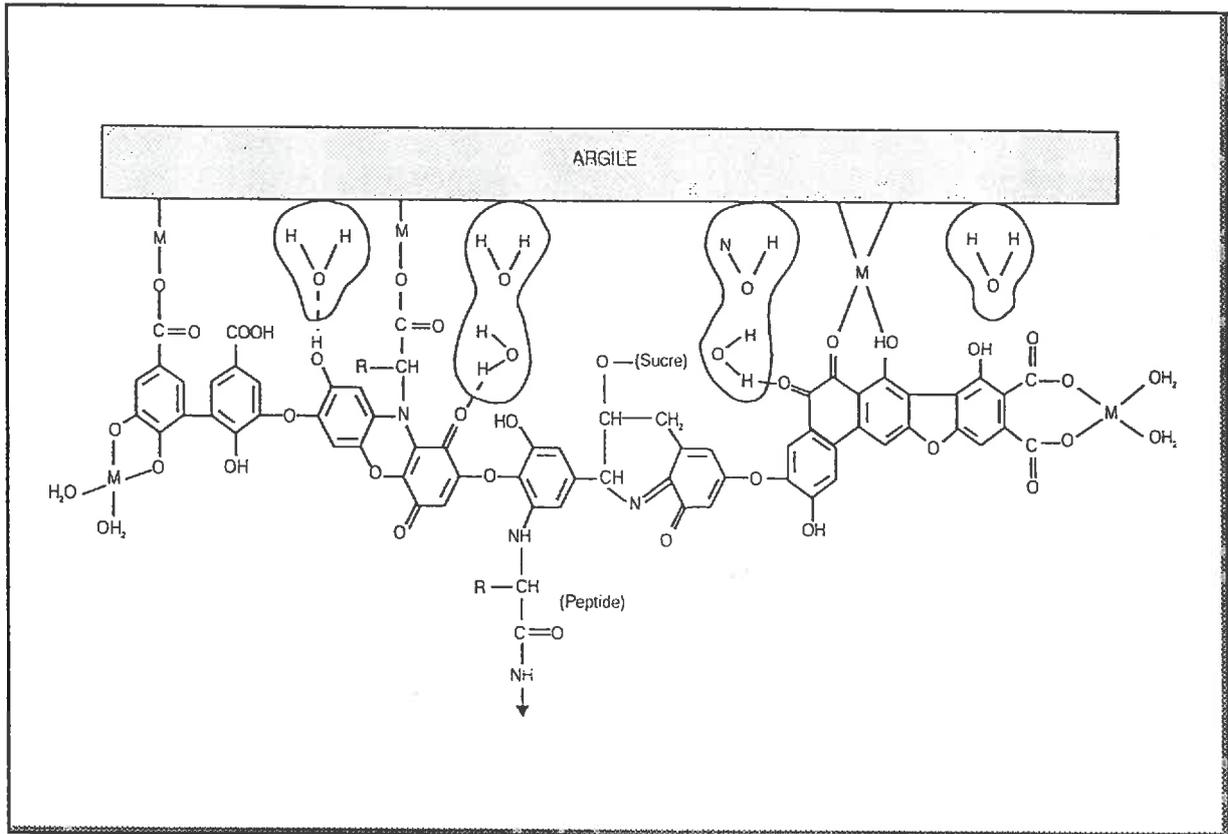


Figure 9 : fixation des acides fulviques sur l'argile d'après H. CHAMAYOU

Outre les éléments minéraux bénéfiques que peut apporter la matière organique (Ca^{++} , Mg^{++} ...), son action complexante, notamment vis-à-vis de l'aluminium soluble ou présent sur le complexe d'échange, aboutissant à la formation de composés peu toxiques pour les plantes, est essentielle.

Ces propriétés de la matière organique jouent un rôle très important dans des sols acides ferrallitiques et ferrugineux à forte proportion de kaolinite avec une faible capacité d'échange.

De nombreux résultats, obtenus sur des essais réalisés en serre ou dans des incubateurs, démontrent l'effet détoxifiant de la matière organique.

La quantité d'aluminium monomérique, forme considérée comme toxique (extraite soit par une résine échangeuse de cations soit par un complexant organique), diminue fortement en présence de matière organique (WHITTEN et RITCHIE, 1991 cités par FALLAVIER 1995).

Au champ, l'essai de Niangoloko au Burkina Faso (PIERI, 1989) est un exemple représentatif

des effets de l'apport de matière organique sur les cultures (ici : mil-arachide ou arachide-sorgho). Sur ces sols dégradés, la baisse de productivité est enrayée par l'apport de fumier de porc (5 tonnes par hectare sur la sole d'arachide).

La matière organique agit aussi directement sur l'amélioration de l'activité biologique : l'essentiel de l'activité respiratoire d'un sol est le fait des microorganismes qui brûlent et rejettent sous forme de CO_2 de fortes quantités de carbone organique par les processus de minéralisation. Les microorganismes favorisent la stabilité structurale des sols (agrégation des produits du métabolisme bactérien, essentiellement des polysaccharides), influent sur la perméabilité à l'eau des sols (les galeries créées par les vers de terre multiplient par 6 la vitesse d'infiltration de l'eau). Ces modifications physiques sont exploitées par les cultures qui développent un système racinaire plus profond et contribuent à l'amélioration durable de la fertilité des sols marginaux.

Il reste une interrogation sur le devenir de la fraction d'Al liée à la matière organique : est-elle passivée définitivement ou bien risque-t-elle d'être restituée dans la solution du sol, après décomposition des colloïdes ?

4-1-3-2 Engrais verts

Ils sont basés sur la production d'une culture associée qui est directement utilisée comme amendement organique.

Cette technique repose sur l'association au système de rotation de cultures, d'espèces assurant une couverture permanente pour limiter les effets de la température, accroître la disponibilité de la matière organique, ralentir sa minéralisation et améliorer les conditions physiques du sol en favorisant son aération. Elle permet de freiner l'agressivité des conditions climatiques.

Les expériences soutenues par la Station de Recherche Agronomique de Chitedze au Malawi vont dans le sens des méthodes décrites ci-dessus. La culture de maïs est entreprise sur des

parcelles séparées par des haies (*Leucaena*). Les haies ne font pas concurrence aux plants de maïs pour l'eau, les feuilles de *Leucaena*, riches en calcium et magnésium, sont appliquées à la surface du sol. Elles améliorent le pH des sols acides, sans apport de matière organique supplémentaire. Les rendements en maïs sont bien meilleurs et sont encore améliorés par l'introduction raisonnée d'un engrais minéral (N) (F. MARKEN, 1993).

4-1-4 Phosphates naturels

Introduits en priorité pour relever dans le sol le taux de phosphore assimilable par les plantes, les phosphates naturels ont un effet bénéfique sur la correction de l'acidité du sol par les éléments minéraux, notamment le calcium, qu'ils contiennent et par leur tendance à augmenter le pH du milieu. Les phosphates d'Afrique de l'Ouest, dont quelques compositions sont détaillées dans le tableau 5, contiennent en moyenne 30.6 % de calcium pour 13.9 % de phosphore.

ORIGINE DES PHOSPHATES	TENEURS EN % DU MINERAI	
	P	Ca
ARLI (Burkina)	13.4	34.0
KODJARI (Burkina)	13.1	32.0
MATAM (Sénégal)	12.8	35.5
TAIBA (Sénégal)	15.9	32.0
TAHOUA (Niger)	15.0	32.0
TILEMSI (Mali)	12.2	30.8
HAHOTOE (Togo)	15.4	26.0
GAFSA (Tunisie)	13.2	22.8

Tableau 5 : teneurs en phosphate total et en calcium de différents phosphates naturels d'Afrique

Le calcium provient, d'après B. TRUONG (1994), de deux origines :

- ✓ du réseau de l'apatite : $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, avec 10 ions calcium pour 6 ions phosphore,

- ✓ des exogènes qui accompagnent souvent l'apatite : calcite, dolomie, aragonite, gypse ...

A la différence des amendements contenant des carbonates (chaux, dolomie) les phosphates naturels ne produisent pas d'effet immédiat sur le pH. Leur action se déroulerait en deux étapes : d'abord libération du calcium et du phosphore, puis l'excès de calcium se transformerait en hydroxyde de calcium.

En Afrique de l'Ouest les gisements de phosphates naturels sont d'origine sédimentaire, plus ou moins compactés, altérés. Ils possèdent des caractéristiques différentes selon leur type de formation et leur histoire géologique; en particulier, leur efficacité agronomique dépend de leur solubilité, les phosphates naturels tendres, comme ceux de Gafsa (Tunisie), étant les plus solubles et les plus exploités.

Sur des sols contenant des argiles primaires et sous des climats tempérés, les phosphates naturels sont bénéfiques à long terme et économiquement rentables. Dans les régions tropicales de notre champ d'intervention, leur action ne se fait sentir que sur une courte période. Les sols ferrallitiques et ferrugineux à forte composition d'argile secondaire (kaolinite) sont en effet des réservoirs inépuisables d'aluminium. Si l'amendement minéral n'est pas appliqué en quantité suffisante, le pH reste inférieur à 5,1 et les ions Al^{+++} échangés par les ions Ca^{++} restent en solution et vont contribuer à augmenter la toxicité aluminique.

Des techniques culturales appropriées sont alors recherchées: semis précoces, cultures associées couverture vive.

4-1-5 Expérimentation

□ Pour illustrer l'effet des amendements sur un sol acide, des essais ont été conduits au laboratoire afin de déterminer l'action de la chaux et du gypse sur des sols acides, dans des conditions simulant un sol bien drainé, soumis à une forte pluviométrie. Prenons l'exemple

d'un sol de Madagascar site d'Ambatolampy (tableau 6).

	Ambatolampy
pH eau	4,65
pH KCl	4,15
Argile %	60
Matière organique	3,7
Al échangeable meq/100g	0,53
CEC meq/100g	1,40

Tableau 6 : caractéristiques physico-chimiques du sol de Madagascar

Ce sol acide de type ferrallitique a une faible CEC caractéristique des sols altérés. L'argile est constituée de 25% de gibbsite et de 35% de kaolinite. Le taux relativement élevé de matière organique peut entraîner la présence de colloïdes à charges variables.

Cinq traitements sont réalisés :

Témoin	0 meq Ca/100g
C1 - CaCO ₃	0,166 meqCa/100g
C2 - CaCO ₃	0,50 meqCa/100g
S1 - CaSO ₄	0,20 meqCa/100g
S2 - CaSO ₄	0,50 meqCa/100g

Le dispositif expérimental choisi permet d'étudier la variation des paramètres de l'acidité en fonction de la profondeur.

2,5kg de terre sont placés dans une colonne de PVC de 11,5 cm de diamètre, pour une longueur de 16,5 cm. Le sol est introduit entre deux couches de sable de Fontainebleau de 1cm d'épaisseur. Un robinet placé sous la colonne permet de récupérer les percolats.

Les amendements sont apportés sous forme solide en haut de colonne, des arrosages quotidiens de 200ml sont effectués. Les solutions de percolation ont été recueillies. Le pH a été mesuré. Vingt deux arrosages ont été réalisés. Après la dernière percolation les colonnes ont été découpées en 7 ou 8 tranches et analysées.

Résultats

De nombreux résultats ont été retirés de cette expérience. Pour illustrer l'effet de l'amendement sur la profondeur du sol, nous allons analyser les variations des concentrations de calcium, d'aluminium, de pH et de la CEC, dans les différentes tranches de sol lessivées par les arrosages, après extraction au cobalthéxamine, Ca et Al échangeables (figures: 10 et 11).

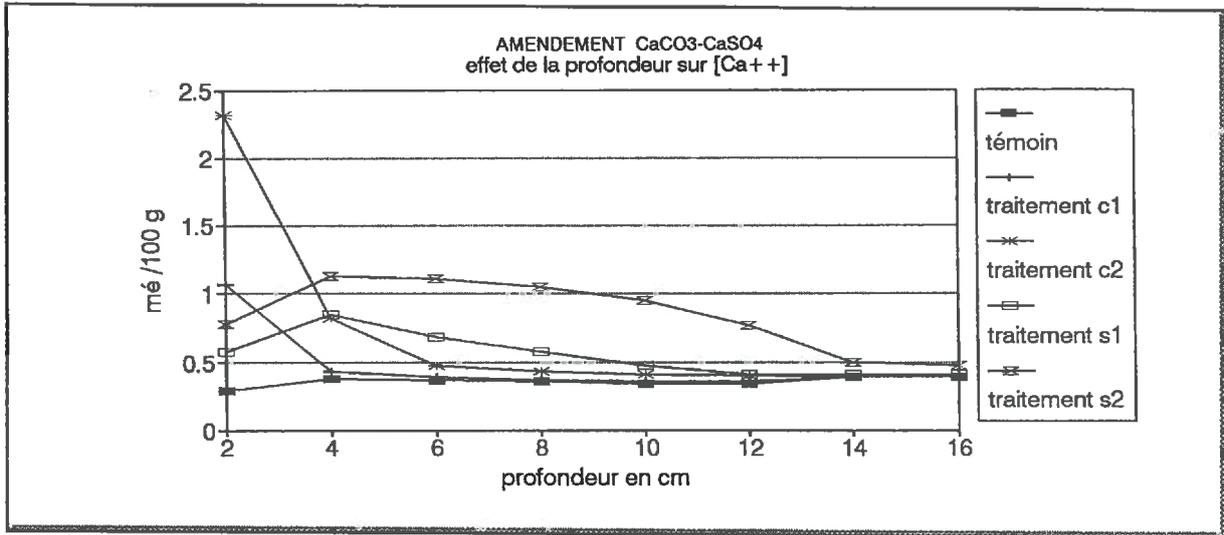


Figure 10 : Echange Ca, effet de la profondeur.

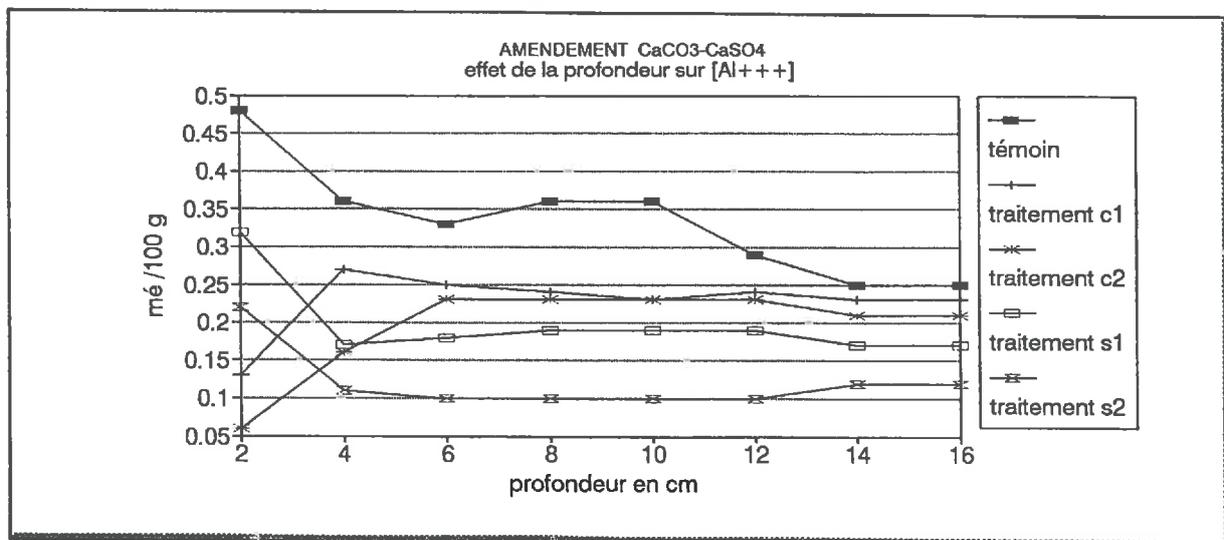


Figure 11 : Echange Al, effet de la profondeur.

Les pH ont été mesurés au cours de l'expérience

	Témoin	CaCO ₃ 0,166 méq/100g	CaCO ₃ 0,50 méq/100g	CaSO ₄ 0,20 méq/100g	CaSO ₄ 0,50 méq/100g
pHeau première tranche	4,70	5,30	5,70	5,10	5,15
pHeau dernière tranche	5,70	5,90	5,75	5,75	5,65
CEC première tranche	1,23	1,61	2,40	1,34	1,44
CEC dernière tranche	1,47	1,42	1,56	1,54	1,66

Tableau 7: Evolution du pH et de la CEC en fonction des traitements et de la profondeur.

L'augmentation de pH (tableau 7) est significative pour l'horizon de surface traité au CaCO₃, alors qu'elle est moins marquée pour les traitements avec CaSO₄. Pour ce type d'amendement, la faible augmentation de pH ne provoque pas une augmentation notable de la CEC, les charges variables n'apparaissent pas, l'échange Ca- Al peut s'effectuer normalement.

L'apport de CaCO₃ provoque une augmentation de pH dans la première tranche de sol. Cela se traduit par une augmentation de la CEC due à la dissociation de la matière organique et du Calcium échangeable. Cet échange Al-Ca diminue rapidement dans les couches intermédiaires, le CaCO₃ ayant une action très localisée en surface. Le sulfate de calcium n'entraîne pas une augmentation significative du pH, l'échange Al-Ca est moins important, comparativement avec le traitement au CaCO₃, mais l'action de l'amendement est efficace dans les couches intermédiaires. Les courbes d'échanges de l'aluminium en fonction des traitements confirment ces remarques.

La représentation des échanges entre l'aluminium fixé sur le sol et le calcium apporté, tous traitements et toutes tranches confondus (figure 12), laisse apparaître une courbure qui s'éloigne de la droite idéale d'échange d'autant plus que la concentration en calcium apporté par les traitements augmente. Cette remarque s'applique en particulier aux horizons de surface. En effet, l'apport de calcium sur un sol contenant des charges variables augmente le pH et la CEC; le calcium sert alors à neutraliser les charges créées il est ainsi détourné de son objectif

premier qui est d'échanger l'aluminium et de le précipiter. Cette remarque ne s'applique pas pour les couches plus profondes, ni à l'apport de gypse qui ne modifie pas le pH.

L'expérimentation démontre que l'échange entre le calcium et l'aluminium décroît fortement au-delà de 0,15még/100g d'Al échangé, dans un sol contenant 4 fois plus d'Al échangeable avec une CEC de 1,4még/100g.

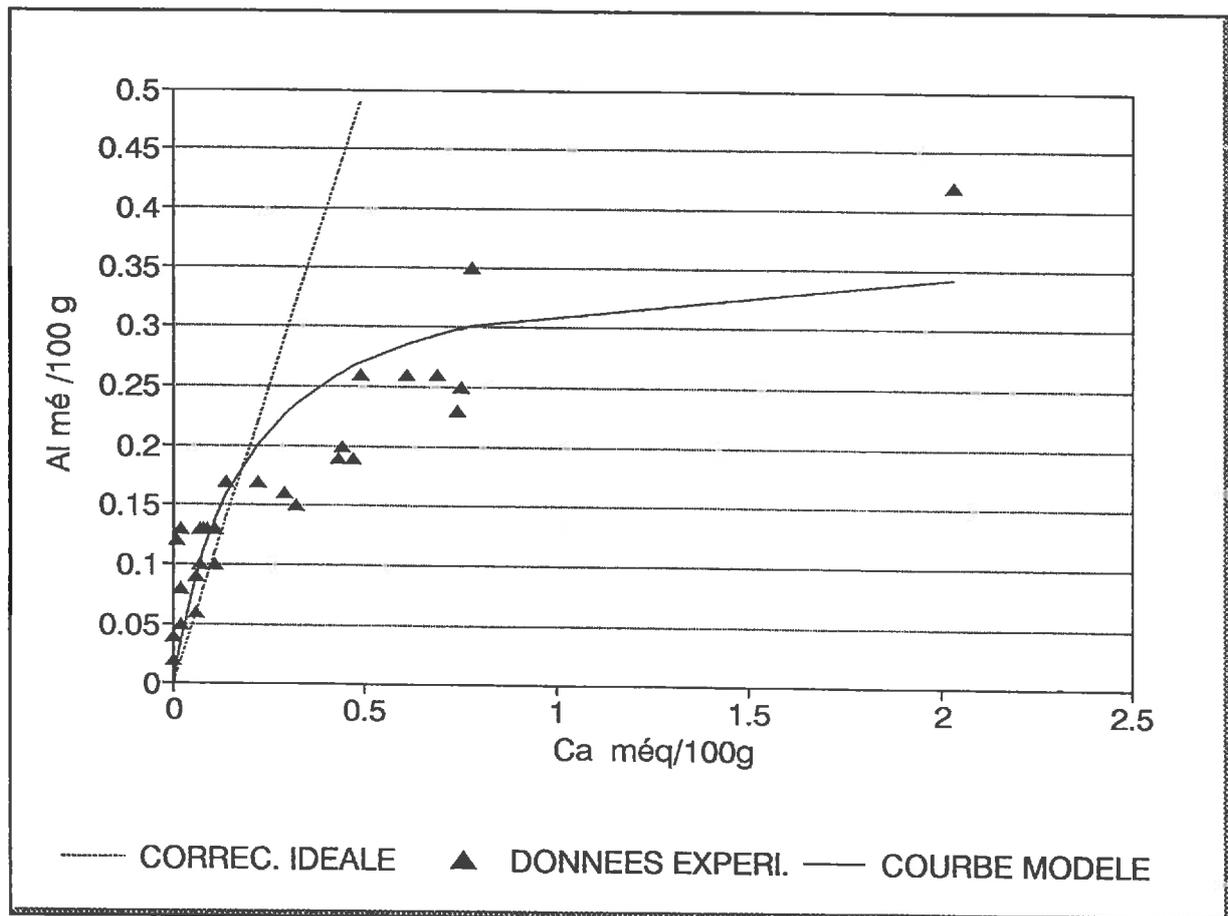


Figure 12 : Modélisation de l'échange entre Al et Ca lors du chaulage du sol d'Ambalolampy (Madagascar).

□ Afin de mettre en évidence l'action de la matière organique et du phosphore, des essais d'incubation ont été menés au laboratoire sur le sol acide d'Ambatolampy.

L'incubation consiste à laisser un sol non drainé évoluer dans des conditions fixées de température et d'humidité, ici 28°C et 37% d'humidité.

L'objectif de l'étude étant de combattre l'acidité des sols par des amendements, les traitements

suivants ont été appliqués :

- ✓ traitement phosphate : apport de phosphore 545mg de phosphore/kg de sol (phosphate naturel de Gafsa)
- ✓ traitement matière organique 1% de paille de sorgho soit 10g par kg de sol

Les traitements sont réalisés sur 1kg de sol dans des pots de 1litre. Des aliquotes de 300g de sol sont prélevées après 1 et 3 mois d'incubation et analysées.

		Al échangeable még/100g	Al en solution micromole/l	pH solution du sol
AMBATOLAMPY sol initial		0.53	7	4.42
incubation 1 mois	témoin	0.19	49	4.70
	paille	0.07	20	4.80
	phosphate	0.06	19	4.81
incubation 3 mois	témoin	0.13	43	4.95
	paille	0.09	22	4.83
	phosphate	0.06	38	5.03

Tableau 8 : résultats des essais d'incubation (apport de matière organique et de phosphates naturels) sur le sol d'AMBATOLAMPY.

Le tableau 7 résume les principaux résultats concernant notre étude.

L'incubation en elle-même produit une augmentation de l'activité biologique, un dégagement de CO₂, une augmentation de pH. Cela produit dans tous les cas de figure une diminution de l'aluminium échangeable qui se retrouve alors dans la solution du sol. Nous constatons que l'apport de matière organique provoque une diminution de l'Al échangeable mais surtout de l'aluminium en solution. L'augmentation de pH favorise la dissociation de la matière organique et l'aluminium en solution est alors complexé.

L'effet n'est pas influencé par le temps d'incubation. L'aluminium en solution est toujours piégé par la matière organique.

L'apport de phosphore permet de fixer de l'aluminium en solution en formant un complexe.

En fonction du temps, le phosphate n'arrive plus à complexer l'aluminium en solution et semble se fixer sur le complexe d'échange.

Ces essais montrent les limites agronomiques des amendements sur des sols acides contenant des colloïdes à charges variables.

La matière organique, dans tous les cas de figure, est l'amendement le plus efficace; son association avec les amendements minéraux classiques comme le gypse ou les phosphates, semble être la meilleure pratique possible pour améliorer la fertilité de ces sols.

Peu d'informations, en revanche, sont disponibles sur la stabilité et la durabilité des complexes associant l'aluminium et la matière organique.

4-2 Limites économiques

Les limites économiques dans les pays sud-tropicaux sont des contraintes difficiles à résoudre.

Les pays de l'Afrique de l'Ouest possèdent de nombreux gisements naturels calco-magnésiens au Bénin, Burkina Faso, Ghana, Mali, Mauritanie, Niger (JOHNSON 1994). La rentabilité économique de l'exploitation des gisements est souvent conditionnée par plusieurs paramètres : tout d'abord, le gisement doit être facile d'accès et d'exploitation aisée (mines à ciel ouvert); puis, la réduction des coûts de transports ne sera réalisée que par un réseau routier développé et une collaboration avec des sociétés de transports structurées et professionnelles; enfin les minerais doivent être de bonne qualité.

Des chercheurs du CIRAD, en association avec des industriels et les organismes nationaux africains, participent à la valorisation des gisements de phosphates naturels en vue de leur exploitation (TRUONG et FAYARD 1994). Le Maroc est le premier pays exportateur de phosphates naturels; la Tunisie transforme 80 % de ses propres phosphates en engrais et d'autres pays (Sénégal, Nigéria, Ouganda) produisent des engrais phosphatés ou ont des projets d'installations d'usines.

Le manque de moyens économiques des pays en voie de développement les prive dans la plupart des cas de l'exploitation de leurs gisements d'agrominéraux dans la perspective d'une utilisation agricole locale. Paradoxalement, les gisements les plus rentables sont exploités industriellement et la production est exportée (Sénégal, Maroc, Tunisie, Algérie) vers les pays développés.

La chaux obtenue après calcination de l'apatite n'est pas disponible en Afrique (usines inexistantes, prix de revient inabordable). L'importation de chaux n'est réalisable économiquement que pour des cultures de rentes. Le réseau routier des zones rurales n'est pas adapté au transport de grand tonnage. Les transports, fluvial ou ferroviaire, concernent davantage les zones industrielles que les secteurs agricoles.

L'amendement minéral en Afrique, en fait, n'existe pas pour l'agriculteur d'une exploitation familiale. Le tissu d'appropriation foncier privé ne fonctionne pas toujours, ce qui entraîne un non fonctionnement du marché du travail, du marché financier et du marché des produits.

Les petits exploitants sont tributaires des services publics et des aides qu'ils sont susceptibles de déployer. Les structures étatiques sont en relation directe avec les organisations internationales et conçoivent en commun des projets; en particulier, les pays qui ont des sols dégradés à protéger se sont dotés d'un département ministériel chargé de gérer ces problèmes. D'autres structures, plus délocalisées et plus proches des populations comme les Offices (Maroc) ou les Sociétés de Développement (Côte d'Ivoire, Madagascar) contribuent à développer les secteurs agro-économiques de leur région. Les associations privées de paysans sous forme de collectivités locales, professionnelles, semblent se multiplier. Des expériences menées sur la base de dotations de petits crédits mutualistes (accumulation de fonds propres), représentant l'année de salaire pour un agriculteur et dont les traites de remboursement sont hebdomadaires, ont réussi leur implantation au Burkina Faso, puis au Mali, au Mozambique, au Niger et à Madagascar. Ces expériences de crédit sont des exemples à transférer pour

subvenir aux besoins en intrants fertilisants des petits exploitants agricoles.

Elles sont appliquées au Zimbabwe et ont permis un accroissement de la production du maïs dans les petites exploitations. Après 1979, la production a triplé, les superficies et les rendements ont doublé. La production supplémentaire a pu être vendue, une politique de commercialisation des semences et des engrais s'est alors développée, l'accès aux marchés est devenu plus facile lorsque l'office de vente des céréales du Zimbabwe a multiplié les points de collecte des récoltes en zone rurale (Banque Mondiale 1989).

Les difficultés s'estompent quand les populations sont associées aux projets, par l'information, la concertation et le partenariat (ARRIGNON 1987).

Pour la culture du maïs, le potentiel de rentabilité économique passe par l'exportation de semences et le développement du marché avicole qui sont les principales perspectives de marchés qui s'offrent aux exploitants agricoles.

La correction de l'acidité par l'introduction d'amendements en quantités suffisantes semblant peu réaliste, une autre voie permettant aux petits agriculteurs locaux d'exploiter des terres fragiles, sans les rendre incultes, doit être envisagée.

4-3 Adaptation de la plante au milieu

L'amendement minéral ou organique des sols pour réduire la toxicité aluminique est une solution, difficile à réaliser économiquement, souvent imparfaite sur le plan agronomique.

L'adaptation du sol aux exigences de la plante étant peu concevable, une autre piste plus facile à suivre pour l'exploitant agricole consiste à adapter la plante aux contraintes du milieu, peut être examinée. Les espèces végétales réagissent en effet d'elles-mêmes aux contraintes aluminiques des sols acides. La réponse de la végétation à la présence d'aluminium peut être très variable selon les espèces : une concentration inférieure à $1\mu\text{M}$ d'aluminium peut être toxique pour certaines plantes sensibles, alors que 800 à $1200\mu\text{M}$ d'aluminium sont nécessaires

pour inhiber la croissance de jeunes pousses d'épicéa *Picea abies L* (T. BECQUER, 1991). Les mécanismes d'adaptation des plantes à la présence d'aluminium sont très divers : certaines espèces absorbent cet élément, d'autres sont capables de le stocker sous des formes non toxiques, complexées avec des acides organiques ou certains composés minéraux. L'aluminium complexé ou sous forme libre peut rester dans les racines (pour la plupart des espèces) ou bien être transporté et stocké dans les feuilles (cas du théier) sans être nuisible à la santé de la plante.

Les plantes naturelles qui poussent sur les sols acides ont une croissance normale et ne développent pas de carence minérale particulière. Pour ces plantes, les éléments minéraux nutritionnels majeurs P, Ca et Mg sont en abondance dans les racines et leurs besoins en nutriments sont limités (MARSCHNER, 1991).

La plupart des plantes cultivées et tolérantes aux sols acides font partie de l'alimentation traditionnelle des pays subtropicaux (igname, manioc, plantain, mil, niébé). Les céréales et les légumineuses à grains, que l'on retrouve dans l'alimentation actuelle, comme le riz, le blé, le maïs, le haricot et le pois, se révèlent plus difficiles à cultiver sur les sols acides. Néanmoins, ces espèces ont des rendements souvent moins aléatoires que ceux des cultures traditionnelles, une potentialité nutritionnelle plus élevée, des conditions de stockage, de conservation et de commerce plus faciles à élaborer.

4-4 Intervariabilité dans l'espèce

Une même espèce peut présenter une variabilité importante à l'acidité des sols, et à la toxicité aluminique.

Le riz est l'exemple le plus probant de cette faculté d'adaptation aux conditions physico-chimiques des sols. Les variétés les plus répandues dans les zones de culture inondées sont très sensibles à la toxicité aluminique alors que le riz pluvial d'altitude est tolérant aux sols

acides (JACQUOT et COURTOIS 1983). Dans le cadre de notre étude nous nous intéresserons particulièrement au cas du maïs qui présente, lui aussi, une variabilité exceptionnelle.

Une même variété de maïs présente des différences de taille, de vigueur et de précocité en fonction de l'hétérogénéité du milieu. De plus, le mode de reproduction des plantes allogames auxquelles appartient le maïs explique aussi les différences d'une même variété. La majeure partie des améliorations variétales du maïs s'attache à accroître les rendements en grains secs de la plante. Les travaux relatifs à la tolérance variétale en sols acides ont été conduits au Mexique par le CIMMYT. Comme pour l'ensemble des espèces végétales, les variétés les plus résistantes aux contraintes naturelles (sècheresse, température, conditions physico-chimiques) sont les espèces sauvages. Elles ont aussi le rendement de production en grains le plus faible.

5- EXPLOITATION DE LA VARIABILITE GENETIQUE DU MAÏS

5-1 Propriétés alimentaires et nutritionnelles du maïs

Le maïs, avec le blé et le riz est la céréale la plus répandue dans le monde. Les surfaces cultivées ne cessent d'augmenter et concernent la plupart des régions du globe (figure 13) d'après F.R RUSKIN (1988). Elle fournit une alimentation de bonne qualité nutritive à l'homme, aux animaux (ensilage maïs-fourrage, graines) et sert de matière première à l'industrie agro-alimentaire.

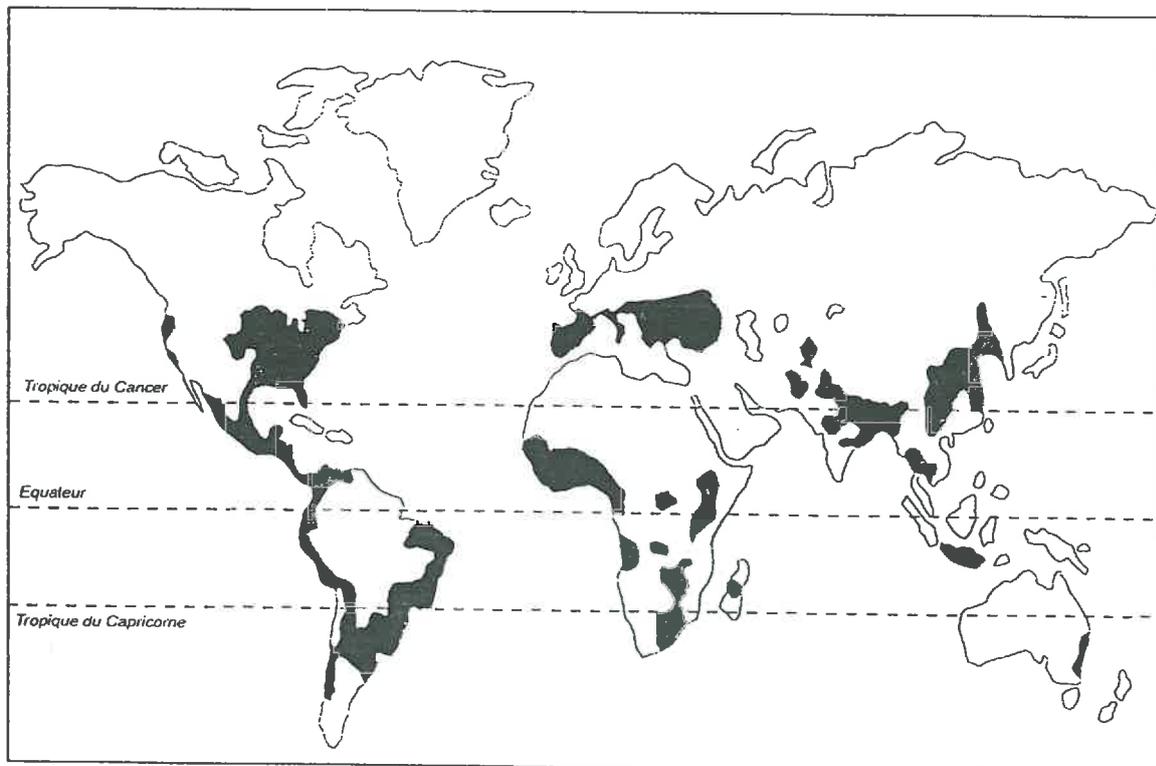


Figure 13 : principales zones de production de maïs dans le monde

En milieu tropical, le maïs reste une nourriture de base pour l'alimentation humaine, puisque 50 à 60 % de sa production est auto-consommée. Le maïs est dégusté sous des formes diverses : alors que 6 % seulement sont utilisés en épi grillé, apprécié comme friandise en dehors des repas, ou bouilli, cueilli avant maturité, il est consommé principalement sous forme de farine. Les préparations et les dénominations sont différentes suivant les régions : le *toh* (pâte translucide non fermentée) en Côte d'Ivoire, la *bouillie* (consommée avec du sucre et du jus de citron) en Casamance, appelée *akpan* au Togo ou *akassa* au Bénin, *l'ogi* (bouillie fermentée et légèrement acide) au Nigéria. Le maïs sert également à la fabrication de *bière* après fermentation des grains dans l'eau.

En Amérique Centrale, la farine de maïs sert de base à la fabrication des *tortillas* (galettes), largement consommées par la population locale. Au Mexique, au Brésil, et en Colombie le maïs occupe plus de la moitié des terres cultivées et reste l'aliment principal pour des millions de personnes, notamment les plus démunies.

En Asie, cette plante est la deuxième denrée de base après le riz tandis qu'en Afrique, le maïs est également une céréale essentielle en particulier en Afrique de l'Est et du Sud. En Afrique de l'Ouest, elle est en pleine expansion, bien que concurrencée par les cultures traditionnelles. Si la culture et la consommation de cette plante se développent dans les pays où elle n'était pas traditionnellement implantée, ce n'est pas toujours par effet de mode, mais surtout pour la valeur nutritive de l'espèce. Les valeurs nutritionnelles de différentes variétés de maïs sont comparées à d'autres céréales dans le tableau 9 (d'après FAO 1993).

Le maïs contient de 8 à 11 % de protéines constituées d'acides aminés; la valeur nutritionnelle des maïs connus a été augmentée en obtenant des concentrations plus importantes en acides aminés essentiels tel que la lysine et le tryptophane. Ces améliorations que l'on retrouve dans le maïs à haute qualité protéique (QPM) évitent les carences nutritionnelles dues à l'alimentation à base de maïs des pays d'Amérique Latine.

Céréale	Qualité protéique (en % des taux d'acides aminés de la caséine)
Maïs commun	32.1
Maïs opaque 2	96.8
QPM	82.1
Riz	79.3
Froment	38.7
Avoine	59.0
Sorgho	32.5
Orge	58.0
Mil chandelle	46.4
Eleusine cultivée	35.7
Teff	56.2
Seigle	64.8

Tableau 9 : qualité protéique du maïs et d'autres céréales, comparée à celle de la caséine, protéine de référence.

L'utilisation du maïs pour l'alimentation animale est la deuxième source de consommation de la céréale dans cette partie du monde. Les élevages avicoles modernes utilisent un aliment à base de maïs (60%), complété par des tourteaux de soja et de coton qui assurent les compléments protéiques nécessaires à la croissance des animaux. C'est le cas, en Côte d'Ivoire, où la part d'utilisation du maïs dans l'alimentation animale s'accroît de 8,5% par an.

5-2 Développement de la culture du maïs en régions tropicales

La culture du maïs dans les régions tropicales est implantée dans trois continents, l'Amérique, l'Afrique et l'Asie.

Les principaux pays producteurs d'Asie sont les Philippines, la Thaïlande et le Népal (National Research Council réf. Cité par PANDEY et GARNER 1992).

En Amérique du Sud, de nombreux organismes comme le CIMMYT travaillent à l'amélioration variétale de cette plante, au développement de sa culture et au suivi de sa commercialisation.

La progression des terres cultivées d'Amérique ne cesse d'augmenter et la mise en culture des terres acides, en particulier au Brésil (Terra rossa des cerrados), pose le problème de

l'adaptabilité de la plante à la toxicité aluminique.

En Afrique, dès son apparition au 15^{ème} siècle, le maïs fut rapidement la céréale de base en Guinée et dans le bassin du Congo. Au 18^{ème} siècle, son implantation se poursuivit vers l'Est et le Sud de l'Afrique. C'est actuellement la céréale la plus produite en Afrique du Sud, au Malawi, en Zambie, au Zimbabwe, au Kenya, ainsi qu'au Ghana, au Nigéria et en Ethiopie. Dans ces pays la consommation moyenne est de 100kg/an par habitant. Le maïs est consommé à un degré moindre (40kg/an/habitant) dans les pays suivants : Mozambique, Tanzanie, Bénin, Togo, Cameroun, Egypte, Côte d'Ivoire (F. RUSKIN 1988).

5-3 Principales améliorations obtenues par la sélection

Les nouvelles biotechnologies ouvrent de nouvelles voies d'amélioration génétique, mais les recherches sont expérimentales et ne permettent pas encore de produire des semences (plasma germinatif) pouvant augmenter les rendements.

Au niveau qui nous intéresse, c'est à dire la culture du maïs en zone tropicale, les améliorations variétales les plus remarquables concernent :

- ✓ la résistance des plants à la sécheresse, aux insectes et à la maladie,
- ✓ l'amélioration nutritionnelle du maïs alimentaire (supplémentation en lysine et en tryptophane)
- ✓ la création de variétés tolérantes à l'acidité des sols.

De nombreuses études et publications émanant des chercheurs du CIMMYT en collaboration avec d'autres organismes, portent sur l'amélioration des variétés de maïs par des sélections récurrentes (MAGNAVACA et BAHIA 1987). Des travaux similaires conduits par LIMA et al (1992), PANDEY et al (1994), DUQUE VARGAS et al (1994) ont amené des améliorations importantes sur le rendement de la culture de maïs en sol acide. Le CIMMYT à Cali (COLOMBIE) a amélioré la population SA3 sur 20 cycles de culture. Le travail de sélection

a commencé en 1970; en 1985, 4 populations résistantes aux sols acides, SA4 SA5-grains jaunes et SA6 SA7-grains blancs furent développées. Les variétés furent alors étudiées en vue de leur adaptation dans différents pays de la zone tropicale sur des sols présentant des taux de saturation en aluminium allant de 40 à 70% et des déficiences en phosphore importantes (5 à 12 ppm). Elles donnent de meilleurs résultats dans des sols acides que des variétés sensibles, mais ces performances ne se retrouvent pas dans des sols moins contraignants.

5-4 Cultures au champ

5-4-1 Sites expérimentaux en sol acide

Dans le cadre de l'étude relative au contrat CEE-STD3 : "Adaptation du maïs aux sols tropicaux acides", des cultures de maïs sur des sites expérimentaux ont été menées en 1993 et 1994. Les organismes signataires du contrat : le CIRAD, l'INRA Guadeloupe, l'EMBRAPA Brésil, le CIMMYT, la CORAF et l'IITA au Cameroun et à Madagascar, ont choisi de mettre en culture des variétés de maïs présentant des sensibilités contrastées à l'acidité des sols (liste des différentes variétés en annexe 12). Des sites expérimentaux ont été sélectionnés sur leurs caractéristiques physico-chimiques et leur toxicité aluminique potentielle appréciée d'après l'analyse des échantillons réalisée à Montpellier.

Les sols étudiés sont de type ferrallitique et présentent des pH acides (4.1 à 4.4). Plusieurs paramètres servent à définir qualitativement le risque de toxicité aluminique

- ✓ la concentration en aluminium dans la solution du sol (extrait 1/1), toxique à partir de 10 μ M
- ✓ le taux de saturation en aluminium sur le complexe d'échange

$$\left(TSA = \frac{Al}{CEC} \times 100 \right), \text{ dangereux au-delà de } 30 \text{ \%}.$$

- ✓ la teneur en matière organique du sol qui peut jouer un rôle modérateur vis à vis de la toxicité aluminique.

Le pH cobaltihexamine reflète la concentration en ions H^+ sur le complexe d'échange, l'élévation de ce paramètre en fonction des traitements entraîne une augmentation de la CEC, liée au développement des charges variables par suite de la dissociation de la matière organique, (tableau 10)

Au regard de ces critères, le sol de NKOEMVONE-ELBOLOWA (Cameroun) présente un risque élevé de toxicité aluminique tandis que le site de CURITIBA (Brésil) affiche un risque moyen, croissant largement avec la profondeur mais pondéré par un taux élevé de matière organique. Si la possibilité de toxicité aluminique est faible à N'KOLBISSON-YAOUNDE (Cameroun), une toxicité manganique est à redouter sur ce site tandis que sur le sol de Guadeloupe, les risques de toxicité aluminique et manganique sont peu élevés.

Identification	Profondeur cm	pH H ₂ O	pH Co	Al (solution du sol) μM	TSA %	MO %	Mn (s. du sol) μM
Cameroun NKOEMVONE ELBOLOWA	0-10	4.38	4.02	47.9	23	3.03	20.0
	20-30	4.38	4.04	3.9	45	-	15.3
	30-60	4.38	4.07	3.9	51	1.06	7.67
Brésil CURITIBA	0-15	4.33	4.13	15.1	24	9.26	35.0
	15-30	4.34	4.13	7.3	41	5.34	5.0
	30-60	4.64	4.18	1.2	83	-	5.0
Cameroun NKOLBISSON YAOUNDE	0-10	5.10	4.18	1.74	13	3.16	350
	20-30	5.92	4.37	1.51	7	-	130
	30-60	5.36	4.76	0.79	3	0.8	70
Guadeloupe	0-20	4.92	4.27	0	18	6	30.0
	20-40	4.90	4.31	0	16	2.1	15.2
	40-60	4.99	4.41	0	10	6.2	20.1

Tableau 10: Mesures physico-chimiques de sols acides (étude STD3) caractéristiques des risques de toxicité aluminique

Des traitements à base d'amendements minéraux et organiques (uniquement sur les sites du Cameroun) ont été effectués sur les parcelles expérimentales afin d'éliminer l'aluminium échangeable. Les doses de produit à épandre sont calculées en fonction du paramètre suivant:

$$(Ca^{++}, Mg^{++}) = 2 \cdot Al^{+++} \text{échangeable.}$$

Cameroun : Les mêmes traitements sont proposés sur les deux sites.

- ✓ Correction partielle : 1 tonne par hectare de dolomie de formule globale $CaMg(CO_3)_2$ (FALLAVIER et al 1995-b-) et 2 tonnes par hectare de fumier de ferme.
- ✓ Correction totale : 2 tonnes par hectare de dolomie et 5 tonnes par hectare de fumier de ferme.

Les doses de Ca^{++} et Mg^{++} correspondent à environ 3 à 6 fois l'aluminium échangeable dans l'horizon de surface.

Brésil : Un traitement de base d'engrais azoté a été appliqué sur toutes les parcelles aux différents stades de végétation du maïs.

- ✓ Trois traitements de chaux dolomitique, contenant autant de Ca^{++} que de Mg^{++} (FALLAVIER et al 1995-a-) ont été appliqués ensuite sur les parcelles de 300 m², à raison de 125, 250, 375 kilogramme par parcelle.
- ✓ Les doses de Ca^{++} et Mg^{++} introduites par les amendements correspondent à 0,5, 1, et 1.5 fois l'aluminium échangeable.

Guadeloupe : De la chaux dolomitique (45 % de CaO et 10 % de MgO) est apportée:

- ✓ Traitement partiel : 1.4 tonne par hectare.
- ✓ Traitement total : 7.5 tonnes par hectare.

Les doses de Ca^{++} et Mg^{++} introduites par les amendements représentent 0,6 et 3 fois

l'aluminium échangeable.

		pH H ₂ O	Al solution μM	TSA %
Cameroun Nkoemvone				
C. partielle	0-10 cm	5.01	11.5	4.0
C. totale	0-10 cm	7.09	5	0.0
C. partielle	20-30 cm	4.17	19.5	40.6
C. totale	20-30 cm	4.12	36.5	33.3
Brésil				
T1	0-10 cm	4.80	0.95	3.8
T2	0-10 cm	5.63	1.26	3.07
T3	0-10 cm	5.93	0.6	1.42
T1	15-30 cm	4.42	7.5	40.75
T2	15-30 cm	4.45	6.55	34.9
T3	15-30 cm	4.44	5.36	29.55
Cameroun Nkolbisson				
C. partielle	0-10 cm	5.43	1.74	6.25
C. totale	0-10 cm	5.29	1.95	3.75
C. partielle	20-30 cm	5.06	1.06	7.5
C. totale	20-30 cm	5.05	0.85	6.5
Guadeloupe				
C. partielle	0-20 cm	4.51	0.85	5.24
C. totale	0-20 cm	5.91	0.0	0.0
C. partielle	20-40 cm	4.46	1.30	8.75
C. totale	20-40 cm	5.49	0.16	0.72

Tableau 11 : Mesures physico-chimiques après traitements

Les résultats physico-chimiques (tableau 11) sont en concordance avec les essais que nous avons entrepris au laboratoire :

- ✓ La correction de l'acidité est effective pour les horizons de surfaces.
- ✓ Par contre dans les horizons plus profonds et en fonction de la concentration initiale en

aluminium, les traitements même les plus complets n'arrivent pas à corriger l'acidité du sol et par voie de conséquence à bloquer l'aluminium en solution.

5-4-2 Résultats variétaux

Les essais de 93 ont connu des fortunes diverses: difficultés pour la mise en place des réseaux, des expérimentations, des échanges de semences. Le décalage des périodes de culture d'une région à l'autre et d'un hémisphère à l'autre ont retardé la réalisation du programme. Les principaux enseignements ont été repris par les expérimentations en 1994 et en particulier la conduite de 3 nouvelles variétés pour des expérimentations au champ, 2 tolérantes (ATP-Y, CC91SA3) et une sensible mais productive (FWIP136) en conditions favorables.

Site de la Guadeloupe :

Les essais sont conduits sur une gamme étendue de génotypes : variétés expérimentales améliorées par sélection récurrente (CIMMYT), composites créés par l'EMBRAPA (Brésil), populations ATD-Y sélectionnées par l'IRA (Cameroun) adaptées aux sols acides de moyenne altitude.

A partir des moyennes et des variances des principaux paramètres de croissance, les milieux ont été classés par ordre de stress (le milieu le plus amendé étant le moins stressant). Sur la parcelle la plus acide (pH= 3.81), les analyses des rendements en grains ont donné une réponse étendue en fonction des génotypes. Dix génotypes montrent une supériorité par rapport au témoin tolérant (CC 915A3); parmi eux une variété à large spectre d'adaptation "INRA SPECTRAL", des variétés expérimentales SA3, SA4, SA6, cette dernière incluant des sources de tolérance à la sécheresse, et le composite CMSO4C. D'autres résultats de la campagne d'essais de 1994 sont attendus. D'autres expérimentations multilocales et pluriannuelles seront entreprises pour cibler les meilleurs génotypes . Ils pourront être alors utilisés en sélection

comme géniteurs pour assurer les transferts des gènes de tolérances à l'acidité. Leur stabilité en situation contraignante sera exploitée dans des expérimentations de pré-développement.

Site du Cameroun :

Le Docteur THE (1994) dans son rapport annuel rappelle que le programme maïs a débuté au Cameroun en 1988 par l'expérimentation de 6 variétés. En 1989, 9 autres variétés furent testées; enfin, en 1993, 28 variétés furent évaluées sur trois sols acides, corrigés par des amendements minéraux. Les conclusions de cette première phase d'expérimentation font ressortir que :

- ✓ l'effet amendement est significatif pour la plupart des variétés testées,
- ✓ la mesure de la longueur racinaire après le stade levée (5 ou 6 feuilles) est un bon critère de sélection
- ✓ les essais doivent être multipliés au niveaux des sites et complétés par des répétitions inter variétales.

En 1994, 26 variétés furent testées sur 2 sites, NKOLBISSON et NKOEMVONE, avec les 3 traitements déjà cités.

Le suivi de croissance des différents plants fait ressortir la vigueur des plantules des différentes variétés tolérantes dans la situation de sol non corrigé. Après la floraison, la variété "INRA SPECTRAL" ne donne pas de bons résultats morphologiques.

Les meilleurs rendements sont obtenus avec la variété ATP yellow; d'autres variétés donnent de bons rendements et sont considérées comme tolérantes sur ces deux sites acides : C525M, ATP white, CIMCALLI 5A3 (Tableau de résultats annexé)

Site du Brésil :

Deux variétés ont été testées, l'une tolérante (C525M) et l'autre sensible HS7777, dans les mêmes conditions de traitements déjà cités. Le but de l'étude est de révéler des paramètres de discrimination entre les deux variétés. Les surfaces foliaires sont mesurées ainsi que le poids des feuilles, des tiges et des racines, à trois stades de culture. Des analyses d'éléments majeurs et d'oligo éléments sont entreprises.

Les principales conclusions révèlent que l'aluminium n'affecte pas au champ le nombre de racines, mais modifie leur élongation pour les cultivars sensibles. Le taux d'aluminium augmente avec le temps en particulier dans les racines. L'aluminium affecte chez le cultivar sensible la production de biomasse. Le cultivar tolérant semble mieux contrôler son prélèvement d'aluminium. Les rendements en grains en tonne/hectare sont résumés dans le tableau suivant.

	T0	T1	T2	T3
HS7777	0.42	1.15	1.03	1.11
C525M	2.32	3.24	3.98	4.50

Tableau 12 : Rendements des variétés HS777 et C525M, après amendements sur sols acides. CURITABA. BRESIL.

L'analyse chimique des profils de sols après la récolte démontre que l'effet du chaulage est efficace seulement sur l'horizon de surface (0-15cm).

Conclusion

La comparaison des résultats inter sites, en particulier Guadeloupe et Cameroun, démontre les problèmes d'adaptabilité des variétés dans différents milieux, l'exemple le plus significatif étant celui de la variété "INRA SPECTRAL", inadaptée aux sols du Cameroun.

Nous avons constaté avec la mise en place des essais du programme STD3 que les

expérimentations aux champs sont difficiles à mener à terme, elles demandent une main d'oeuvre importante, un suivi attentionné et des conditions climatiques favorables; de plus, les principales données et les conclusions de l'essai ne sont disponibles qu'après un cycle de culture (120 jours en moyenne). Pour estomper l'hétérogénéité des sols, plusieurs cycles de culture sont indispensables afin de cibler les meilleures générations d'hybrides tolérantes à l'acidité. La discrimination entre variétés tolérantes et sensibles a pu être mise en évidence dans les expérimentations au champ que nous venons de décrire par des mesures morphologiques, physico-chimiques et l'évaluation des rendements de récoltes. Les principales différences entre les variétés tolérantes et sensibles impliquent l'apparition de mécanismes physiologiques encore mal connus : néanmoins, plusieurs hypothèses sont émises et demandent à être vérifiées par des expérimentations.

5-5 Mécanismes de la tolérance des plantes à la toxicité

Les hypothèses concernant les mécanismes de tolérance des plantes à l'excès d'aluminium dans les sols (TAYLOR 1988, MARSCHNER 1991) peuvent être classées en deux catégories :

- ✓ le mécanisme de tolérance par exclusion de l'aluminium à l'extérieur de la cellule,
- ✓ le mécanisme de complexation de l'aluminium à l'intérieur de la cellule.

Dans le premier cas, l'aluminium peut:

- ✓ soit être absorbé au niveau de la paroi cellulaire,
- ✓ soit polymérisé et précipité suite à une augmentation de pH au niveau de la rhizosphère due aux exsudats organiques sécrétés par les racines,
- ✓ ou encore être exclu de la cellule suivant le phénomène de perméabilité sélective du plasmalemme au passage des ions à l'intérieur de la cellule.

Dans le deuxième cas, la détoxification de l'aluminium à l'intérieur de la cellule peut s'expliquer :

- ✓ par une combinaison de l'aluminium avec des protéines spécifiques
- ✓ par une augmentation de certaines enzymes qui présentent une tolérance à la toxicité aluminique
- ✓ par une compartimentation dans des organites spécifiques
- ✓ par la formation de complexes organiques dans le cytoplasme.

Selon cette dernière hypothèse, les acides organiques à l'intérieur de la cellule pourraient chélater l'aluminium et assurer ainsi la détoxification de la plante.

Par exemple pour le sorgho, les cultivars tolérants sont capables d'absorber moins d'aluminium que les variétés sensibles. L'analyse des acides organiques montre une nette augmentation de leur concentration dans les racines de cultivars tolérants soumis à des stress aluminiques (CAMBRAIA et al 1983, GALVEZ et al 1991).

Nous avons constaté au chapitre 3 que les complexes organo aluminiques n'étaient pas toxiques pour les plantes. Afin de vérifier que la détoxification de l'aluminium peut être réalisée par des acides organiques contenus dans les racines, nous avons étudié leur mode d'extraction et leur dosage. L'étude faite par N.V.HUE et al (1986) sur le pouvoir détoxifiant des acides organiques est significative. L'auteur classe les acides organiques en fonction de leur aptitude à chélater l'aluminium pour laquelle la position sur la chaîne carbonée principale des fonctions COOH et OH est prépondérante. Les acides les plus chélatants sont des triacides ou des diacides dont les fonctions COOH et OH sont portées par des carbones adjacents comme l'acide citrique et l'acide tartrique, ou avec deux fonctions acides carboxyliques adjacentes (acide oxalique).

D'autres diacides sont moins chélatants, leurs groupements acides n'étant pas tous adjacents

aux hydroxyles (malique, salicylique, malonique).

L'auteur précise que les acides détoxifiants forment avec l'ion aluminium un cycle stable de 5 ou 6 atomes. Les constantes de formation des complexes alumino organiques donnent en fonction de leur pouvoir complexant un classement relatif des acides organiques :

Acide citrique > acide oxalique > acide tartrique > acide malique > acide acétique > acide formique

Ces hypothèses sont à mettre en parallèle avec les travaux de SUHAYSA et HAUG (1986) sur des variétés de maïs en culture hydroponique. Il a constaté que l'aluminium induisait une diminution de la teneur de la plupart des acides organiques dans les racines de maïs, et que seule la concentration en acide citrique (pour la variété tolérante) était en augmentation.

6- TESTS DE LABORATOIRE

6-1 But

L'infertilité des sols acides est complexe à analyser. Les cultures expérimentales au champ sont longues, économiquement difficiles à supporter pour les organismes nationaux des pays en voie de développement car les résultats ne sont exploitables qu'après plusieurs cycles de culture. La création, par les voies de sélection classique, de nouvelles variétés de maïs tolérantes à la toxicité aluminique a commencé il y a plus de trente ans; celles-ci sont toujours en voie d'amélioration.

Les variétés nouvelles de maïs ne s'adaptent pas facilement sur d'autres sols aux caractéristiques comparables à ceux où elles furent créées. Pour confirmer un essai au champ ou vérifier une hypothèse relative à la croissance des plantes, les agronomes, et en premier lieu les physiologistes, ont imaginé les cultures en milieu hydroponique.

L'étude de différentes variétés de maïs cultivées en laboratoire dans des solutions nutritives appropriées permettent un test de discrimination rapide entre les variétés sensibles et tolérantes à la toxicité aluminique. Les cultures en laboratoire sont produites sur des milieux liquides enrichis en éléments minéraux essentiels à la croissance de la plante. Dans les solutions nutritives ainsi constituées, il est possible de contrôler de nombreux paramètres. Pour l'étude de la tolérance des variétés de maïs à la toxicité aluminique, ces systèmes de cultures permettent le suivi du pH de la solution, des concentrations en Al dans la solution, dans la plante et de vérifier la présence d'autres espèces caractéristiques comme les acides organiques. La décroissance racinaire, principale conséquence physiologique de la toxicité aluminique, est mesurée dès la mise en culture.

6-2 Cultures hydroponiques

Les milieux artificiels de culture ont servi à l'étude de la nutrition minérale des plantes. Les premiers auteurs ont travaillé avec des concentrations élevées en constituants minéraux (HOAGLAND et ARNON 1950, CLARK 1982).

D'autres chercheurs (FOY et al 1972, MUGWIRA et al 1976 et HARIAH et al 1990) ont composé des solutions nutritives plus diluées pour étudier l'effet de la toxicité aluminique sur des cultures vivrières (haricots, blé, riz, orge). Les solutions nutritives utilisées sont dans tous les cas plus concentrées que les solutions du sol où les plantes se développent normalement (CALLOT et al 1982).

La notion de force ionique est un élément important à considérer : elle détermine l'activité de chaque élément dans la solution. Elle est fonction de la nature, de la concentration des éléments nutritifs et du pH du milieu.

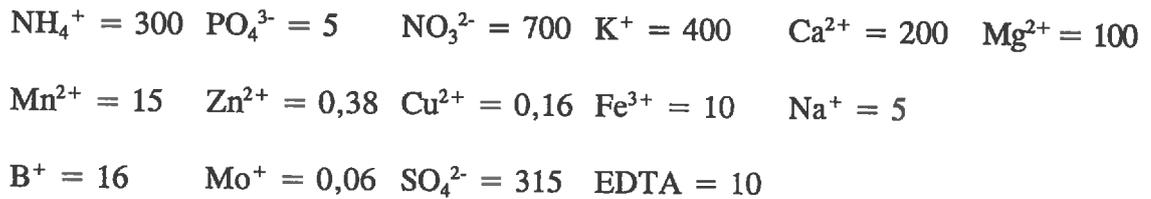
A titre indicatif, la force ionique de la solution de sols acides est généralement inférieure à 5000 micromoles par litre tandis que la concentration en aluminium excède rarement 50 micromoles par litre (EDMEADES et al 1985, BRUCE et al 1989 cités par PINTRO 1995).

Afin de mener une expérimentation de culture hydroponique dans des conditions comparables à celles que l'on trouve dans des sols acides, José PINTRO a réalisé une solution nutritive contenant la même concentration en éléments minéraux que la solution de deux sols acides.

La solution du sol est obtenue après extraction d'un mélange eau/sol dans un rapport 1/1.

Les deux sols ayant servi de référence à l'élaboration de la solution nutritive sont connus pour leur caractère acide (pH=4,60) et le risque de toxicité aluminique qu'ils présentent, confirmés par leurs caractéristiques physico-chimiques. Le premier sol provient de BOUAKÉ (CÔTE D'IVOIRE) et contient 16,9% d'argile (fraction granulométrique inférieure à $2\mu\text{m}$) essentiellement constituée de kaolinite tandis que le deuxième est celui d'AMBATOLAMPY (MADAGASCAR), déjà cité.

La solution nutritive a été constituée de la façon suivante :



Le pH est fixé à 4.4, les concentrations sont exprimées en micromoles par litre.

6-3 Etude de 2 variétés

Les deux variétés testées, C525M et HS7777 sont étudiées dans le cadre du contrat STD 3 et sont réputées pour leur réponse contrastée à la toxicité aluminique.

Les hybrides simples 1276 et 1595N sont respectivement les parents mâle et femelle de l'hybride double C525 (CARGILL 525). L'hybride double ayant une hétérogénéité élevée, les essais sont entrepris sur la variété C525 M (mâle), hybride simple plus homogène. Il est réputé pour sa tolérance à la toxicité aluminique sur sol acide.

L'hybride HS7777 (EMBRAPA) est considéré comme sensible à la toxicité aluminique. Les deux variétés, originaires du Brésil, sont considérées comme source génétique d'amélioration végétale; elles sont utilisées pour fabriquer des hybrides doubles et ne sont pas commercialisées en vue d'une production au champ.

6-4 Description des essais

6-4-1 Conditions de cultures

* Les solutions nutritives :

Deux essais de culture en solutions nutritives entrepris dans le cadre de notre travail ont été mis en place et réalisés par J. PINTRO en 1995. Le premier étudie l'effet de la toxicité de l'aluminium sur quelques paramètres physiologiques des deux variétés de maïs; le deuxième s'applique à évaluer la composition en acides organiques des racines et des parties aériennes

des plantules des deux variétés, soumises à un stress aluminique.

A la solution nutritive décrite au chapitre 5-2 sont ajoutées des quantités connues et croissantes de chlorure d'aluminium pour obtenir des solutions contenant respectivement 0, 5, 10, 15, 30 μM en aluminium pour le premier essai et de 0, 10, 30 μM en aluminium pour le deuxième. Les solutions sont contenues dans des bacs de 7 litres. Le pH est fixé à 4,4 par une solution d'acide chlorhydrique 0,1N. La solution nutritive est renouvelée tous les jours, pour assurer une concentration constante en éléments minéraux et en ions aluminium. La valeur de la force ionique ainsi que l'activité de l'ion aluminium sont calculées par le logiciel GEOCHEM dont quelques résultats sont présentés dans le tableau 13.

Concentration d'Al (μM)	0.00	5.00	10.00	15.00	30.00
Activité d'Al (μM)	0.00	1.70	3.40	5.10	10.30
Force ionique (μM)	1943	1962	1981	1999	2057
Cations (méq/l)	1.35	1.36	1.38	1.39	1.42
Anions (méq/l)	1.32	1.33	1.35	1.36	1.39
Distribution des espèces d'Al en % relatif					
Al libre (Al^{3+})	-	52.50	52.8	53.10	53.80
Al complexé avec SO_4^{2-}	-	28.00	28.00	28.00	28.00
Al complexé avec OH	-	12.00	12.10	12.10	12.30
Al complexé avec PO_4^{3-}	-	7.00	6.60	6.30	5.40
Al complexé avec $\text{B}(\text{OH})_4$	-	0.40	0.40	0.40	0.40
Al complexé avec EDTA	-	0.10	0.10	0.10	0.10

Tableau 13: Concentration, force ionique et spéciation de l'aluminium dans la solution nutritive.

On constate que la valeur de la force ionique augmente de 5% pour des concentrations en Aluminium, allant de 0 à 30 μM . L'augmentation de l'activité de Al^{3+} est fonction de l'augmentation de la concentration en Al total. L'espèce libre Al^{+++} est prédominante (53%) par rapport aux autres complexes aluminiques.

*** Le matériel végétal :**

Les graines de maïs sont désinfectées par trempage dans une solution d'hypochlorite de sodium

(NaClO 1% en volume), pendant trente minutes, puis rincées plusieurs fois avec de l'eau ultra pure ($1\mu\text{S}/\text{cm}$).

Les graines sont ensuite enveloppées dans du papier buvard, humidifiées et mises à germer dans une étuve à 25°C pendant 66 heures à l'abri de la lumière.

Après germination, les plantules comportant une racine séminale uniforme d'une longueur de $6 \pm 1\text{cm}$ sont mises dans les bacs contenant les solutions nutritives. Chaque bac contient vingt plantules. Les solutions nutritives sont aérées par bullage d'air ambiant en utilisant une pompe à air et des diffuseurs. Les essais sont effectués dans une chambre de culture, où la température est fixée à $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, et l'humidité relative à $70 \pm 1\%$. L'intensité lumineuse est assurée par 30 lampes fluorescentes de 36 watts chacune, positionnées à 50cm au dessus des plantules. La photopériode est de 14 heures (planche 1).

6-4-2 Prélèvement des échantillons

Le premier essai est arrêté après sept jours de culture. La racine principale de chaque plantule est mesurée avec une règle graduée au millimètre (planche 2). Les racines sont rapidement rincées par une solution de $200\mu\text{M}/\text{l}$ de CaCl_2 , à pH 4.4, à température ambiante, pour éliminer l'excès d'aluminium adsorbé à la surface des racines. Ensuite, elles sont abondamment lavées à l'eau ultra-pure. Les parties aériennes et les racines seront séchées dans une étuve à 70°C pendant 72 heures. La matière sèche est déterminée par pesée sur une balance au 1/10 de milligramme.

Pour le deuxième essai, les plants sont retirés après respectivement: 1, 5 et 7 jours de culture.

Les plantules sont séparées en trois parties: graines, parties aériennes et racines.

Les parties aériennes et les racines après avoir été abondamment rincées à l'eau ultra-pure sont congelées dans l'azote liquide et lyophilisées pendant 24 heures. Ensuite, elles sont broyées à $50\mu\text{m}$ et stockées à -18°C .

Planche 1: Dispositif de mise en culture hydroponique des plants de maïs

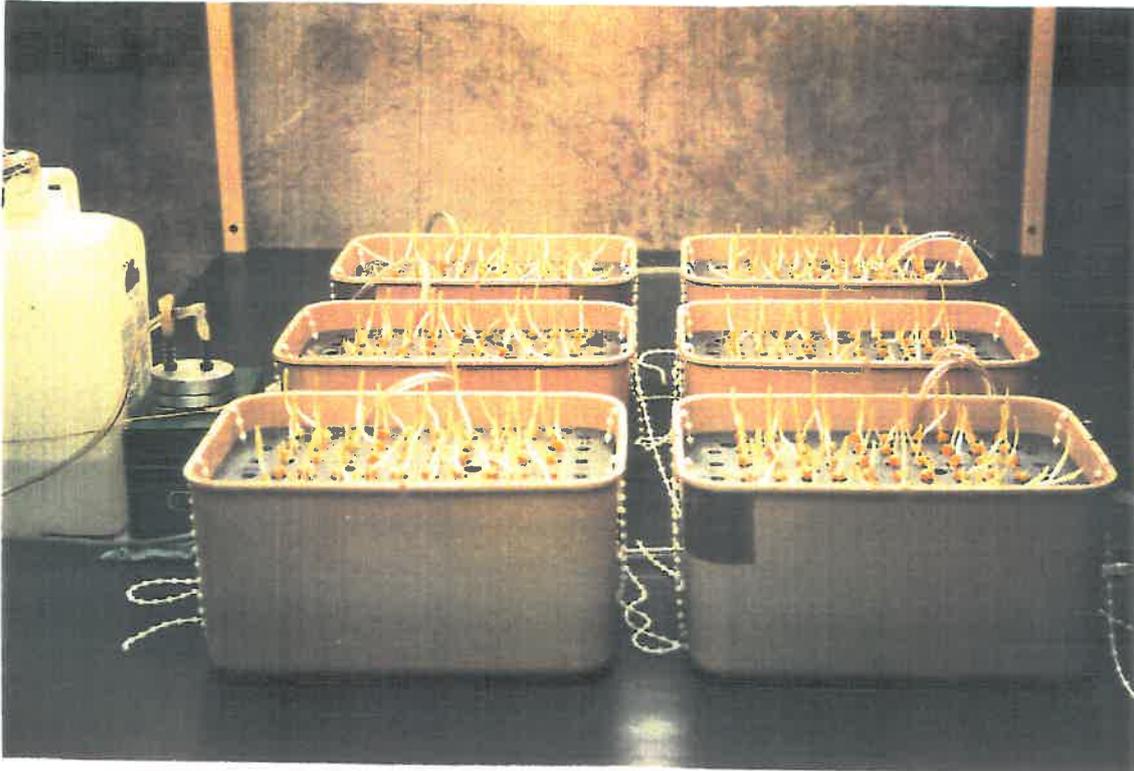
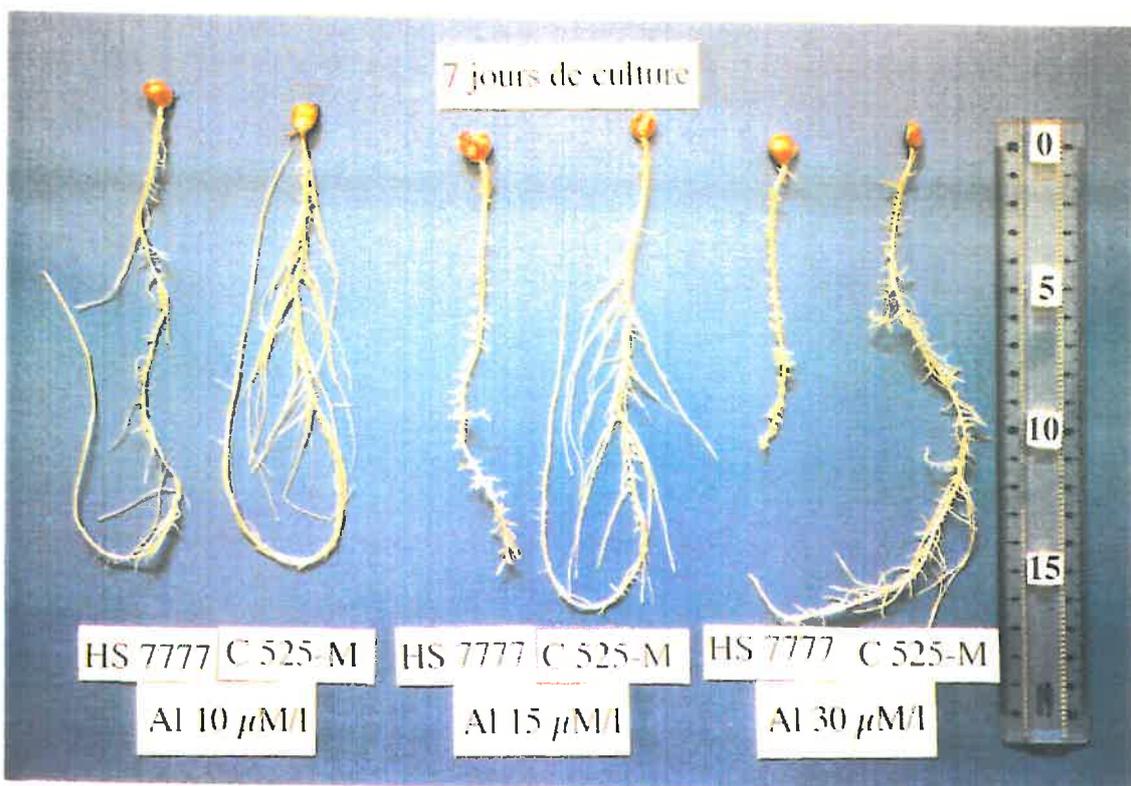
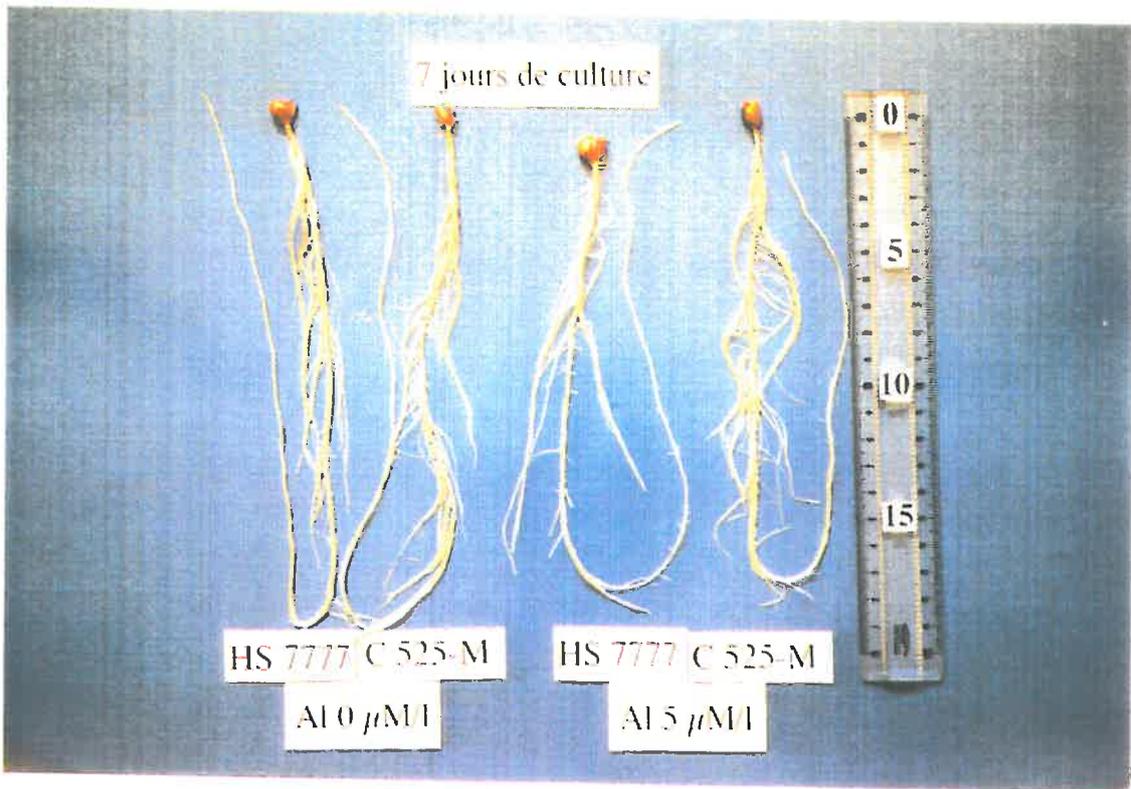


Photo 1 : plants de maïs après 1 jour de culture



Photo 2 : plants de maïs au 7^{ème} jour de culture

Planche 2 : allongement racinaire des plants de maïs après 7 jours de culture à différentes concentrations d'Al



6-4-3 Détermination de l'aluminium

L'échantillon sec est mis dans des capsules de porcelaine et minéralisé au four à 500°C pendant 2 heures. Les cendres sont ensuite reprises par 10ml d'acide chlorhydrique 0,24N. La solution est versée dans un tube et centrifugée à 1800g pendant 10 minutes.

La détermination de l'aluminium est faite par spectrométrie d'émission plasma (JOBIN YVON JY50) sur un prélèvement direct de la solution.

6-4-4 Mesure de l'allongement de la racine

Nous pouvons exprimer :

- ✓ l'allongement de la racine principale par la formule : $Lfs - Li$ ou $Lfa - Li$
- ✓ l'allongement relatif par la formule $\{Lfa - Li\} / \{Lfs - Li\} \times 100$

Lfs : longueur de la racine principale après 7 jours de culture sans Al dans la solution nutritive

Lfa : longueur de la racine principale après 7 jours de culture avec Al dans la solution nutritive

Li : longueur de la racine principale au départ de la culture

6-5 Extraction et dosage des acides organiques

6-5-1 Réactifs d'extractions

L'extraction des acides organiques dans les racines de maïs a nécessité une étude de mise au point des procédés d'extraction. ROUX et LESAIN (1959), CAMBRAIA et al (1983) ont extrait les acides organiques en utilisant de l'alcool éthylique à 80% (3 minutes à ébullition pour une méthode, 10 minutes à température ambiante pour l'autre méthode). D'autres auteurs FOY et al (1990), GALVEZ et al (1991) DELHAIZE et al (1993) préconisent l'extraction par un acide fort: H_2SO_4 ou $H_3 PO_4$ à une concentration comprise entre 0,01N et 0,6N à température ambiante ou à 4°C. Les dosages d'acides organiques sont effectués ensuite par

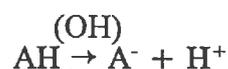
chromatographie liquide haute performance.

Des études menées au laboratoire (LOPEZ 1994) ont montré la difficulté de doser qualitativement et quantitativement par chromatographie ionique les acides organiques en présence d'anions SO_4^{2-} ou PO_4^{3-} provenant de réactifs d'extraction composés d'acides minéraux concentrés. Seul l'emploi d'acide chlorhydrique à une concentration inférieure à 0,1M ne perturbe pas la lecture du chromatogramme.

Le caractère labile des acides organiques en solution nous a conduit à expérimenter des solvants d'extraction à différentes concentrations en alcool éthylique. Les différences de solubilité des acides organiques dans l'alcool éthylique (exemple de l'ion citrate trois fois plus soluble dans un extrait à 20% que dans un extrait à 80% d'éthanol) et les essais de conservation des acides organiques en solution, nous ont amené à utiliser un solvant d'extraction contenant 20 %.

Les essais menés à différentes concentrations d'acide chlorhydrique (de 0,001 à 0,1N) nous montrent que les acides quinique et formique sont dégradés (à chaud) par une concentration d'acide supérieure à 0,01 N. Par contre, l'extraction de l'acide oxalique est incomplète (inférieure d'un facteur 2,5) pour une concentration d'acide chlorhydrique de 0,001N (par rapport à 0,005N). Ces remarques nous ont amené à travailler avec de l'acide chlorhydrique 0,005N (pH = 2,3). Des essais de température et de temps d'extraction ont ensuite permis d'optimiser la méthode d'extraction.

La détermination des acides organiques par chromatographie ionique suppose leur totale dissociation avant passage sur la colonne de séparation. Cette condition est réalisée pendant l'analyse par le choix d'un éluant basique (NaOH) comme l'indique la réaction de dissociation :



L'étude théorique conduite au chapitre 3 avec le logiciel GEOCHEM et confirmée par un travail antérieur (PIOMBO 1994) sur l'analyse de l'acide oxalique en présence d'ions calcium, fer et aluminium, a montré la stabilité de complexes associant acides organiques et aluminium

à des pH supérieurs à 3. Cette observation impose donc d'obtenir avant l'injection un extrait acide débarrassé de tout cation minéral et fixe les contraintes que doit subir la solution à analyser :

- ✓ utiliser dans la solution d'extraction de l'éthanol à 20 %.
- ✓ extraire les cations de la solution par une résine échangeuse de cations sous forme H^+
- ✓ acidifier le milieu d'extraction .

Ces mesures ont été effectuées sur des parties aériennes de plantules de maïs de la variété tolérante C525M cultivées en milieu hydroponique pendant 7 jours dans une solution contenant $30\mu M$ d'aluminium. Le mode opératoire de la méthode d'extraction ainsi que les résultats des essais d'extraction sont détaillés en annexe 15.

6-5-2 Chromatographie ionique

Après obtention sous forme anionique des espèces chimiques à analyser, la technique repose sur l'échange ionique entre un soluté véhiculé par une phase mobile et une phase stationnaire. Les anions, dans le soluté, sont en compétition avec les sites ioniques de la phase stationnaire. L'interaction entre les anions du soluté et les sites d'échange de la phase stationnaire (résine pelliculaire cationique) est régulé par la force ionique de l'éluant (NaOH).

L'appareillage (DIONEX 4500I) est composé de différents modules (annexe 16). La station de dégazage pressurisée sous hélium évite la carbonatation des éluants et conditionne la distribution de 4 éluants. La pompe à gradient quaternaire programmée par un microprocesseur assure la circulation et la mise sous pression de la phase mobile, dont la composition, contrôlée par microprocesseur, peut varier dans le temps (gradient d'élution).

Le passeur d'échantillons (ICS M728) permet d'injecter automatiquement l'échantillon dans le système chromatographique. La colonne (AS11) est précédée de deux précolonnes (ATC et

GC) et suivie d'une membrane de suppression chimique (A.M.M.S.) chargée d'éliminer la conductivité parasite. La détection est effectuée par un conductimètre, lui-même relié à un intégrateur (SHIMADZU CR5A) qui trace les chromatogrammes, imprime les bulletins d'analyses et commande l'ensemble de la chaîne.

La méthode d'analyse fait appel à la calibration externe. Les standards sont préparés à partir de sels de sodium (MERCK) de l'anion considéré; ils sont mis en solution dans de l'éthanol à 20 % et sont ainsi conservés pendant plusieurs semaines.

Après élimination des cations et filtration à $0.45 \mu\text{m}$, 15 microlitres de solution à analyser sont injectés dans la colonne. Un gradient d'élution est nécessaire pour séparer les anions minéraux et organiques contenus dans les échantillons. La séparation de certains couples d'acides organiques de pKa peu différents (succinate, malate) n'est possible que par l'addition de méthanol (8 % à 16 % suivant les séparations envisagées) dans la phase éluante (figure 14).

Le profil du gradient utilisé pour le dosage des acides organiques dans les plants de maïs est détaillé en annexe 17.

Avant chaque injection la colonne est conditionnée 10 minutes par les éluants programmés au temps 0 .

Le débit est fixé à 1.3 millilitre par minute ,la pression affiche 1300 psi.

Ces paramètres analytiques permettent de séparer dans de bonnes conditions de reproductibilité (de 3% à 5% suivant le temps de rétention de la molécule dans la colonne) les anions suivants :

- ✓ monovalents : quinate, acétate, formate, pyruvate, galacturonate, chlorure ,nitrate.
- ✓ divalents : succinate, malate, malonate, tartrate, fumarate, sulfate, oxalate.
- ✓ trivalents : phosphate, citrate, isocitrate, cis et trans aconitate.

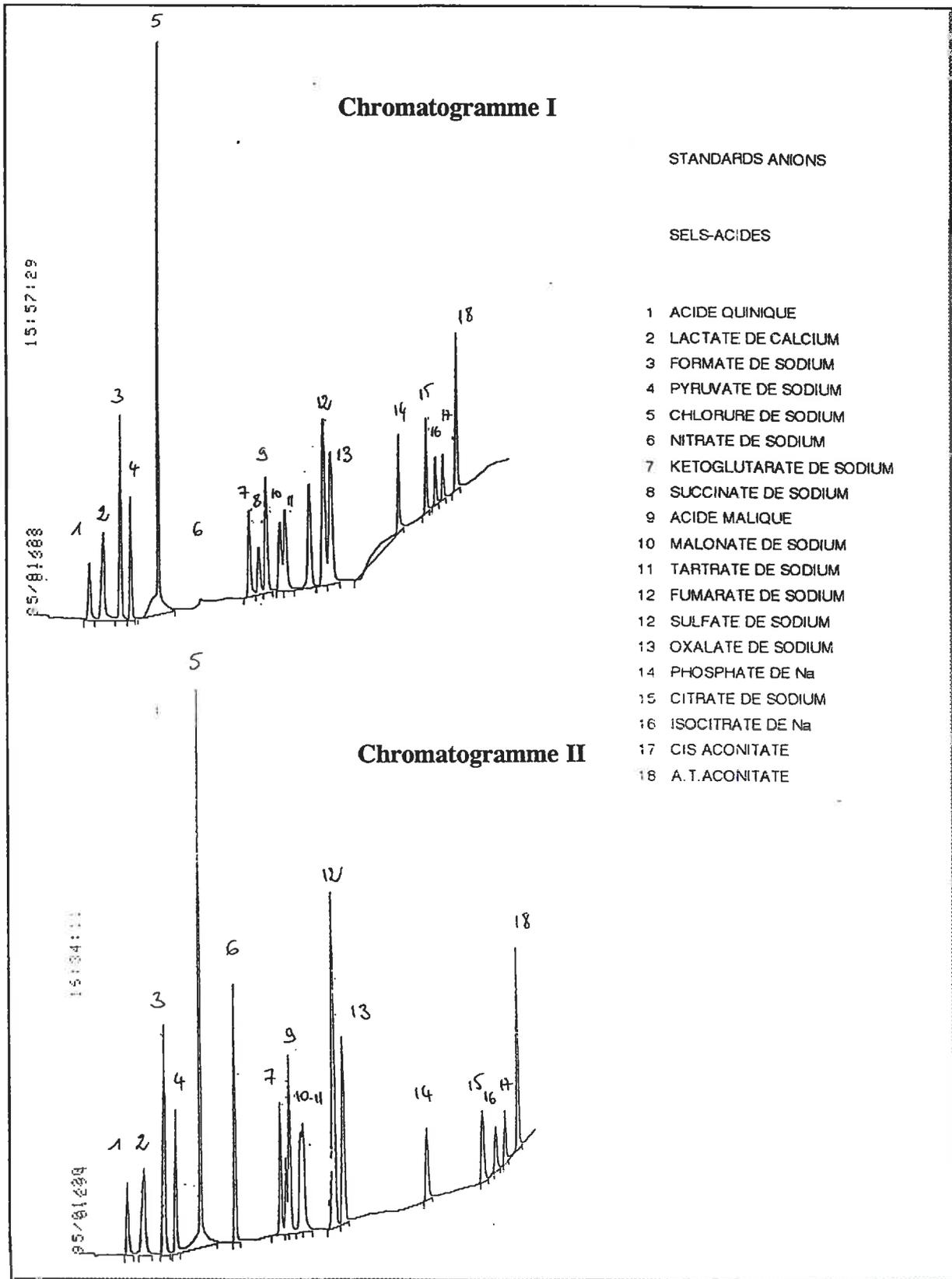


Figure 14 : Chromatogrammes tests de solutions synthétiques d'acides organiques.
 Concentration de 5 à 10 mg/l par anion.
Chromatogramme I : élution avec 16 % de méthanol.
Chromatogramme II : élution avec 8 % de méthanol.

6-6 Résultats

6-6-1 Croissance racinaire

Les résultats décrivant l'allongement racinaire (y) en fonction de l'activité en Al (x) s'ajustent bien ($R^2=0.99$) à l'équation proposée par KINRAIDE (1989), cité par PINTRO (1995)

$$y=100 \cdot e^{-ax^b} ; \text{ les mesures portent sur 12 répétitions pour chaque activité en Al.}$$

Dans la solution nutritive contenant en moyenne 53% d'ions Al^{+++} , toxique, la croissance racinaire des deux cultivars est différente (figure 15 d'après PINTRO). A partir d'une activité de $1,7\mu M$ en Al, la réduction racinaire de la variété sensible HS7777 est significative. Pour des activités d'aluminium plus importantes, les différences sont plus marquées: $3,5\mu M$ d'Al provoquent une réduction de 50% de la croissance de la racine principale pour la variété sensible. La variété tolérante supporte mieux les effets de l'excès d' Al^{+++} bien que la croissance diminue en fonction de l'augmentation de l'activité de l'ion aluminium.

Nous avons constaté que la réduction de la longueur de la racine principale de la variété sensible est compensée par une augmentation de son diamètre. Les cellules des racines des variétés sensibles sont plus endommagées que celles des variétés tolérantes. La variété tolérante C525M a une meilleure capacité à préserver l'activité méristématique au niveau de l'apex comme le démontre sa croissance racinaire dans un milieu où l'activité d'Al est importante. Ces résultats sont en concordance avec ceux présentés par M. ANDRE (1993). L'auteur, après une culture de 7 jours dans une solution nutritive analogue à celle mise au point par J. PINTRO, réalise à partir de la croissance racinaire, un classement de 13 variétés de maïs en fonction de leur tolérance à l'excès d'aluminium en solution.

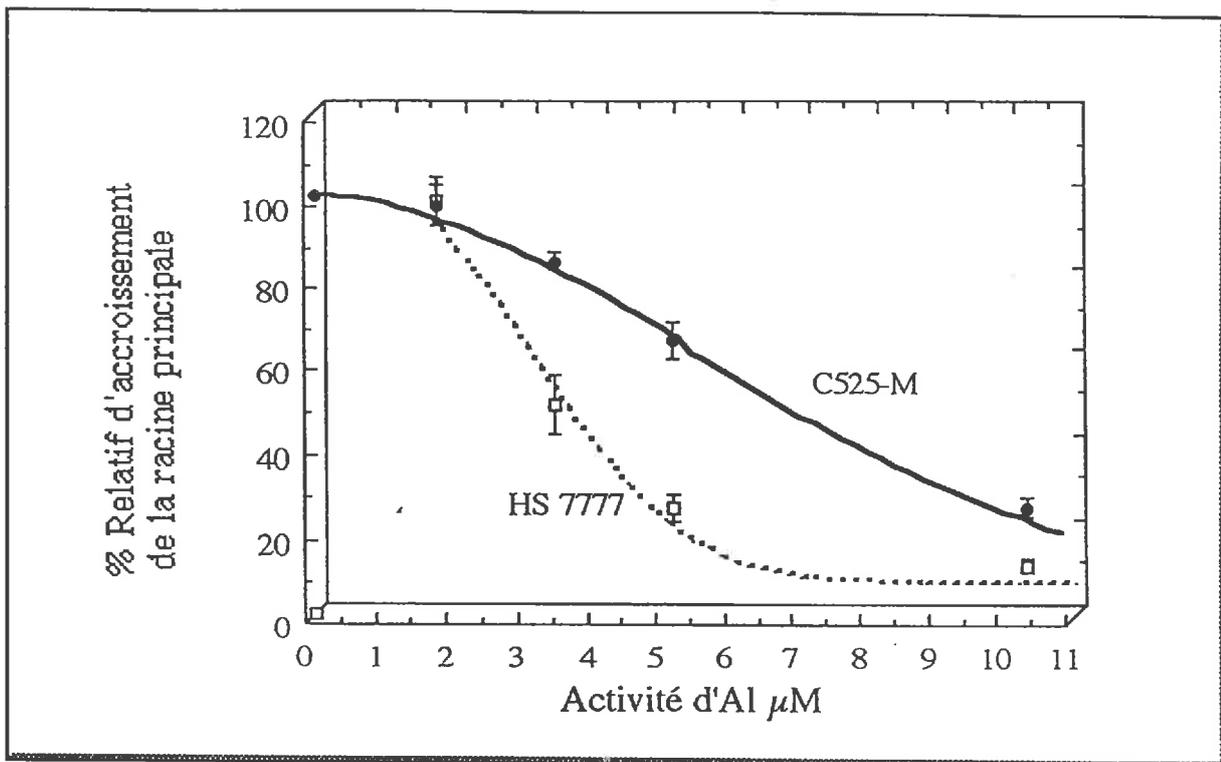


Figure 15 : croissance racinaire de deux variétés de maïs cultivées en solution nutritive en présence de l'ion Al^{3+}

6-6-2 Concentration en Al dans les parties aériennes et dans les racines

Les figures 16 et 17 (d'après PINTRO 1995) représentent l'évolution de la concentration en aluminium total dans les parties aériennes et dans les racines.

Les teneurs en Al dans les racines et les parties aériennes augmentent en même temps que l'activité de l'ion aluminium dans la solution nutritive.

- ✓ Dans les parties aériennes les concentrations en Al sont plus importantes dans la variété sensible et la différence de concentration entre les deux variétés s'intensifie en fonction de l'augmentation de l'activité aluminique.
- ✓ Dans les racines, la concentration en Al est en moyenne 60 fois plus forte que dans les parties aériennes. La différence de concentration en Al entre les deux variétés n'est pas significative; par contre, comme pour les parties aériennes, elle s'intensifie en fonction de l'augmentation de l'activité aluminique.

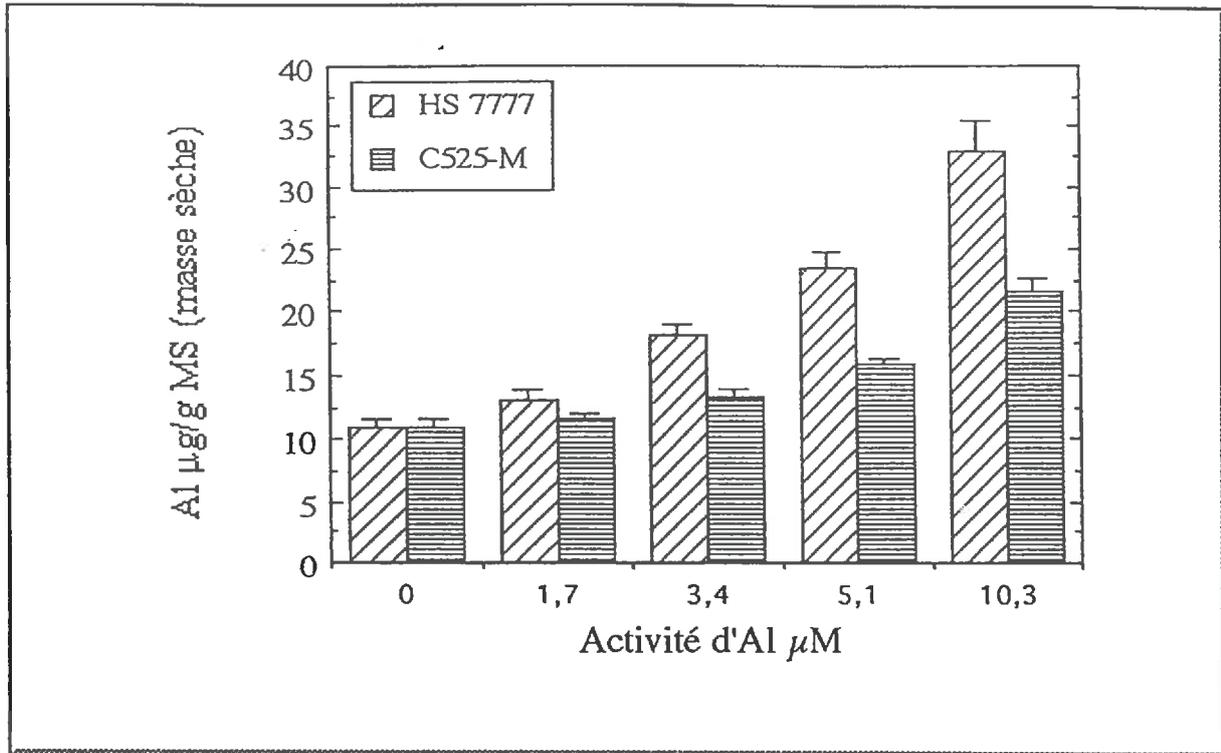


Figure 16 : concentration d'aluminium dans les parties aériennes de deux variétés de maïs cultivées en solutions nutritives en présence d'aluminium

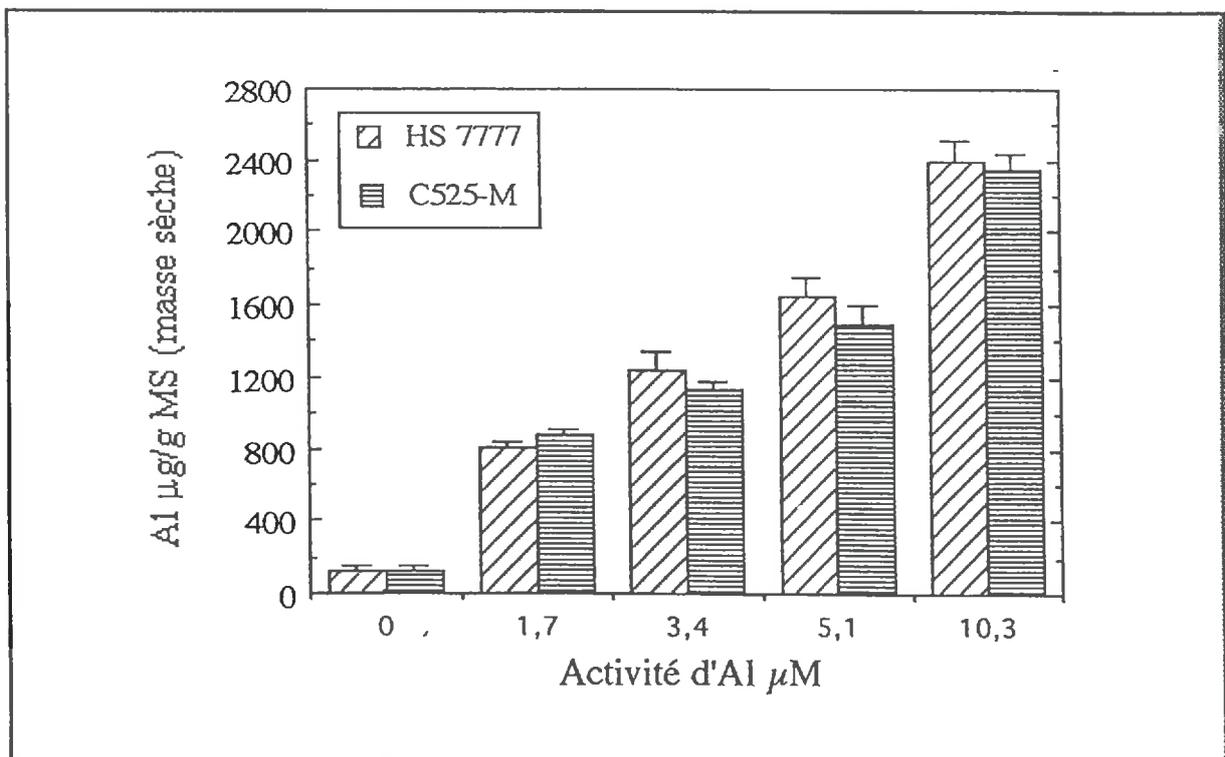


Figure 17 : concentration d'aluminium dans les racines de deux variétés de maïs cultivées en solutions nutritives en présence d'aluminium

6-6-3 Acides organiques

6-6-3-1 Analyses statistiques

Les résultats de l'essai relatif à la détermination des acides organiques sont présentés sous forme de tableaux 14 et 15, après étude statistique effectuée à l'aide du logiciel "STATGRAPHICS".

Une analyse multifactorielle de la variance est réalisée en considérant la variété, l'activité aluminique et le temps de culture comme variables.

La première partie de chaque tableau évalue, par l'analyse de la variance et l'application du test de FISCHER au niveau de probabilité de 5%, la signification de l'effet des facteurs étudiés et de leurs interactions. La deuxième partie précise pour chaque niveau des 3 facteurs, la moyenne (3 répétitions) des teneurs en acides organiques (en $\mu\text{g/g}$ de matière sèche) dans les organes et leur signification après application du test de DUNCAN.

Source de variation	Acides organiques												
	Cis-Aconitate	Trans-Aconitate	Citrate	Formiate	Isocitrate	Lactate	Malate	Malonate	Oxalate	Quinate	Tartrate	Succinate	
Variété	S	S	NS	S	S	S	S	S	S	NS	S	S	
Al (activité μM)	S	S	NS	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Temps (jours de culture)	S	S	NS	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
<i>Interactions</i>													
Variété x Al	S	S	NS	S	S	S	S	S	S	NS	S	S	
Variété x Temps	S	S	NS	S	S	S	S	S	S	NS	S	S	
Al x Temps	S	S	NS	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Teneur en acide organique ($\mu\text{g g}^{-1}$ masse sèche)													
Variété	HS7777	3247 a	9792 a	1156 a	1688 a	759 b	1098 a	3307 b	530 a	1342 a	1611 a	288 b	219 a
	C525-M	2182 b	6652 b	1484 a	1178 b	2732 a	966 b	3405 a	303 b	916 b	1945 a	339 a	140 b
Al	0,0	2685 b	7744 b	1088 a	881 c	1885 a	1200 b	3120 b	418 ab	841 b	1087 b	82 c	229 a
	3,4	2746 a	9213 a	1533 a	2100 a	1824 a	1461 a	3912 a	383 b	1669 a	2237 a	497 a	173 b
	10,3	2712 a b	7709 b	1341 a	1318 b	1528 b	1065 c	3037 b	448 a	841 a	2011 a	362 b	137 c
Temps	1	4929 a	14394 a	967 a	1256 b	1073 b	628 c	2856 c	580 a	746 c	2278 a	156 c	266 a
	5	1609 b	5464 b	1442 a	2005 a	2083 a	1256 a	3681 a	345 b	1677 a	1534 b	445 a	150 b
	7	1605 b	4808 c	1553 a	1038 c	2080 a	1211 b	3531 b	324 b	964 b	1522 b	340 b	123 c

S = significatif, NS = Non significatif ($P = 0,05$)

Pour variété, Al et temps : dans les colonnes verticales, moyennes suivies de la même lettre ne diffèrent pas selon le test DUNCAN ($P = 0,05$)

Tableau 14 : étude multi-factorielle des teneurs en acides organiques dans les parties aériennes de plants de maïs

Acides organiques																								
Source de variation	Cis - Aconitate		Trans - Citrate		Formiate		Isocitrate		Lactate		Malate		Malonate		Oxalate		Quinate		Tartrate		Succinate			
	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Variété	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Al (activité μM)	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Temps (jours de culture)	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
<i>Interactions</i>																								
Variété x Al	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Variété x Temps	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Al x Temps	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Teneur en acide organique ($\mu\text{g g}^{-1}$ masse sèche)																								
Variété	HS7777	892 a	3229 a	3136 a	1109 a	105 b	1615 a	4114 a	280 b	832 a	3956 b	238 a	238 a	238 a	238 a	238 a	238 a	238 a	238 a	238 a	238 a	238 a	238 a	238 a
	C525-M	826 b	2657 b	1964 b	568 b	181 a	869 b	2906 b	312 a	386 b	6782 a	133 b	133 b	133 b	133 b	133 b	133 b	133 b	133 b	133 b	133 b	133 b	133 b	133 b
Al	0,0	763 c	2657 c	757 c	435 c	329 a	1200 b	1869 c	363 a	530 b	4049 c	73 c	73 c	73 c	73 c	73 c	73 c	73 c	73 c	73 c	73 c	73 c	73 c	73 c
	3,4	832 b	2904 b	2943 b	1063 a	50 b	1461 a	3947 b	277 b	646 a	5712 b	218 b	218 b	218 b	218 b	218 b	218 b	218 b	218 b	218 b	218 b	218 b	218 b	218 b
	10,3	981 a	3265 a	3951 a	1018 b	50 b	1065 c	4713 a	248 c	652 a	6347 a	266 a	266 a	266 a	266 a	266 a	266 a	266 a	266 a	266 a	266 a	266 a	266 a	266 a
Temps	1	2537 a	8173 a	1802 c	655 b	214 a	899 c	2983 c	309 b	468 b	6087 a	236 a	236 a	236 a	236 a	236 a	236 a	236 a	236 a	236 a	236 a	236 a	236 a	236 a
	5	40 b	490 b	3215 a	1298 a	100 c	1836 a	4441 a	224 c	973 a	5916 b	196 b	196 b	196 b	196 b	196 b	196 b	196 b	196 b	196 b	196 b	196 b	196 b	196 b
	7	0 c	164 c	2634 b	563 c	115 b	990 b	3105 b	355 a	387 c	4104 c	124 c	124 c	124 c	124 c	124 c	124 c	124 c	124 c	124 c	124 c	124 c	124 c	124 c

S = significatif ($P = 0,05$)Pour variété, Al et temps : dans les colonnes verticales, moyennes suivies de la même lettre ne diffèrent pas selon le test DUNCAN ($P = 0,05$)

Tableau 15 : étude multifactorielle des teneurs en acides organiques dans les racines de plants de maïs

6-6-3-2 Résultats

- ✓ Pour les racines, quelle que soit la source de variation (variété, niveau d'aluminium, ou temps de culture), les teneurs en acides organiques sont significatives. La même remarque s'applique pour les interactions étudiées.
- ✓ Pour les parties aériennes, seules les teneurs en citrate et quinate (variété, variété*aluminium, variété*temps), ne sont pas significatives.

Les teneurs totales en acides organiques sont plus importantes dans la partie aérienne que dans les racines. L'aluminium entraîne une augmentation significative de la teneur en acides organiques par rapport au témoin. Elle est croissante en fonction du niveau d'aluminium pour les racines, elle est plus importante au niveau $3.4\mu\text{M}$ d'activité d'aluminium pour la partie aérienne.

Globalement les teneurs en acides organiques sont plus importantes dans la variété sensible HS7777 que dans la variété tolérante C525M.

Les différences de teneurs en acide citrique, ligand organique le plus détoxifiant, ne sont pas significatives pour les parties aériennes. Par contre, dans les racines, ces teneurs augmentent en fonction du niveau d'aluminium en solution. Elles augmentent aussi en fonction du temps de culture, jusqu'à 5 jours, puis diminuent comme tous les autres acides organiques (sauf pour le malonate).

6-6-4 Discussion

Les travaux en cultures hydroponiques ont démontré que l'un des premiers symptômes de la toxicité aluminique sur les plantules de maïs est la réduction de la croissance racinaire. Elle est corrélée avec l'activité de l'ion aluminium (toxique) en solution. Les différences de concentrations en aluminium dans les parties aériennes des deux variétés, démontrent que pour la variété tolérante (C525M), il existe un blocage plus important du transport de l'aluminium

des racines vers la partie aérienne. La perméabilité des parois cellulaires semble jouer un rôle important. La plante réagit physiologiquement à l'excès d'aluminium. Il est logique de vérifier alors les mécanismes de détoxification de l'aluminium et en particulier l'un de ceux les plus cités, à savoir la complexation de l'ion aluminium par les acides organiques contenus dans les racines.

Les essais réalisés ont démontré une augmentation de la teneur en acides organiques à l'intérieur de la cellule dans les racines et la partie aérienne en fonction de l'augmentation de la concentration en aluminium dans la solution, mais nous avons constaté que la teneur totale en acides organiques est plus importante dans le cultivar sensible HS7777 que dans le cultivar tolérant C525M. Ces résultats sont contraires aux travaux de CAMBRAIA et GALVEZ déjà cités.

Deux hypothèses peuvent être émises (GALVEZ et al 1991) :

- ✓ Premièrement, une inhibition des activités des enzymes associées au processus de dégradation des acides organiques entraînerait l'accumulation de ces composés organiques. Dans ce cas, les cultivars sensibles auraient une concentration en acides organiques plus importante par rapport aux cultivars tolérants.
- ✓ Dans le deuxième cas, l'aluminium réduirait l'activité des enzymes associés au processus de synthèse, les cultivars sensibles présenteraient alors des teneurs plus faibles en acides organiques.

Les résultats que nous avons trouvés confirmeraient la première hypothèse. Les acides organiques ayant un faible pouvoir de complexation, comme le cis et trans aconitate, ont des teneurs élevées (dans les racines) le premier jour de culture, puis diminuent. Ces résultats laissent supposer l'apparition d'un processus de dégradation des activités enzymatiques de l'aconitase (CAMBRAIA et al 1983) . En revanche les acides organiques à fort pouvoir complexant comme le citrate et le malate, ont des teneurs qui augmentent jusqu'au cinquième

jour de culture. L'ensemble de ces résultats laisse supposer un dysfonctionnement dans le déroulement du cycle de Krebs , avec inhibition ou activation des systèmes enzymatiques impliqués dans la synthèse comme la citrate synthétase (M.ANDRE 1993).

D'autres auteurs comme FOY et al (1990), BLAMEY et al (1990) considèrent qu'il existe peu de relations entre la concentration en acides organiques dans les racines d'une plante et sa tolérance à la toxicité aluminique. D'autres mécanismes relatifs à la complexation de l'aluminium comme l'excrétion d'acides organiques à l'extérieur de la plante (MARSCHNER 1991, DELHAIZE et al 1993) ont été mis en évidence.

La complexation de l'aluminium à l'intérieur de la cellule est peut-être surestimée. Le pH du cytosol est environ de 7.5 (MARSCHNER 1991) et la concentration en Al^{+++} est alors théoriquement nulle.

Des expérimentations en cultures hydroponiques similaires sont menées dans le cadre du programme STD3 à l'ENSA de Rennes (J.BARLOY et al 1995). Le dosage d'acides organiques dans les racines et les parties aériennes de variétés de maïs tolérantes et sensibles laisse apparaître une acidité organique totale plus forte chez le cultivar tolérant, mais la concentration en acide citrique (le plus complexant) est plus importante chez le cultivar sensible. Ces résultats contradictoires laissent supposer que le rôle des acides organiques comme composés détoxifiants est discutable et reste à prouver.

En conclusion, il semble opportun de recueillir de nouvelles informations sur les mécanismes d'exclusion des acides organiques des racines vers les solutions nutritives. D'autres tests de laboratoire doivent être entrepris afin d'exploiter le rôle de l'aluminium sur l'activité des enzymes dans les cellules méristématiques .

Dans l'état actuel de notre étude, et avant d'attribuer aux acides organiques un rôle important ou négligeable sur leur aptitude à détoxifier l'aluminium, il convient d'engager de nouveaux essais de cultures hydroponiques et de déterminer les acides organiques excrétés dans la

solution nutritive.

Un étudiant de troisième cycle réalise actuellement un travail sur la localisation des sites d'acidification le long des racines et sur la dynamique d'échange de l'aluminium dans la rhizosphère. D'après ces travaux, il semble que l'acidification en présence de l'Aluminium est localisée dans le dernier centimètre de la racine (apex), alors que la zone de proximité subit des variations de pH moins importantes. L'agarose a été choisi comme support de culture et se conduit comme un échangeur ionique à charge variable libérant l'aluminium lorsque le pH diminue (H. CALBA et al 1995).

CONCLUSION

Les qualités nutritionnelles du maïs pour l'alimentation humaine et la demande de plus en plus forte relative aux besoins de la production avicole, poussent les agriculteurs des pays en voie de développement à étendre la culture du maïs sur des terres marginales. L'extension de la culture en zone tropicale humide se heurte aux caractéristiques physico-chimiques particulières des sols acides.

Pour lever ces difficultés, nous avons envisagé deux solutions. La correction de l'acidité des sols ou la transformation de la plante en vue de son adaptation au terrain. L'acidité des sols résulte en fait de l'altération des sols et de la transformation des argiles en kaolinite et en gibbsite. L'aluminium ainsi libéré dans la solution du sol s'avère très rapidement (5 à 10 μ M d'Al) toxique pour les plantes.

La correction de l'acidité peut être obtenue par des amendements minéraux, qui permettent, suivant le cas, d'augmenter le pH des sols, de passer l'aluminium ou de favoriser l'augmentation de la capacité d'échange cationique des sols. Cet amendement sera d'autant plus efficace qu'il sera complété par un apport de matière organique indispensable dans ces sols à faible capacité d'échange. Les principales difficultés pour amender un sol en zone tropicale sont d'ordres agronomiques et économiques, les efforts effectués par les organismes internationaux ou d'états pour aider les agriculteurs sont souvent peu efficaces, faute de moyens.

Dans ce contexte, l'étude menée conjointement par le CIRAD et ses partenaires sur l'adaptation du maïs aux contraintes de la zone tropicale humide s'avère pertinente. Le maïs se prête, par sa variabilité, à des améliorations génétiques. Le mode de reproduction du maïs permet aux sélectionneurs de créer des variétés remarquables en particulier au niveau nutritionnel, mais aussi physiologique, résistantes à la sécheresse et aux maladies et, dans le cas qui nous intéresse, tolérantes à l'acidité des sols (ou plus précisément à la toxicité aluminique).

Les essais au champ de variétés tolérantes ont permis d'améliorer les cultivars, mais de nombreux chercheurs utilisent les cultures hydroponiques afin d'étudier plus rapidement et plus précisément les paramètres les plus significatifs.

La mise au point d'une solution de culture contenant des éléments nutritifs, à des concentrations similaires à celles que l'on rencontre dans les solutions de sols acides de la zone tropicale humide, nous permet de mettre en évidence la différence de sensibilité entre deux variétés de maïs (C525M et HS7777).

L'allongement racinaire est affecté par des activités croissantes d'aluminium dans la solution; il est plus important pour la variété C525M, la variété HS 7777 affichant une plus grande sensibilité à partir d'une activité d'aluminium de $1.7 \mu\text{M}$. La croissance racinaire est le paramètre le plus démonstratif pour déterminer l'aptitude d'un cultivar à résister à une toxicité aluminique.

Les quantités d'aluminium dans les racines ne fournissent pas une information suffisante pour discriminer les variétés tolérantes ou sensibles; néanmoins, la variété C525M a montré un blocage plus important du transport d'Al des racines vers la partie aérienne.

Les acides organiques contenus dans les racines ne semblent pas être la clef d'un des mécanismes importants de détoxification de l'aluminium.

L'étude de la complexation de l'aluminium par des acides organiques doit être poursuivie dans d'autres directions.

Notamment, des études basées sur les propriétés d'échange entre la racine et le milieu considéré permettront peut-être de vérifier d'autres mécanismes de détoxification, en particulier ceux liés à l'excrétion de composés organiques à l'extérieur des racines.

BIBLIOGRAPHIE

ADAMS F., 1984. Soil acidity and liming.
 Edité par l'auteur 2^{ème} édition - 380 pages

ALVA A.K., P.F.C.BLAMEY, D.G.EDWARDS, C.J. ASHER 1986. Relationships between of aluminium monomers in nutrient solutions. Soil Sci.Soc.Am.J. 50 :959-962.

ALVA A.K., M.E. SUMNER, 1989. Alleviation of aluminium toxicity to soybeans by phosphogypsum or calcium sulfate in dilute nutrient solutions. Soil Sci. 147 : 278-285.

ANDRE M., 1993. Toxicité ,acides organiques et tolérance à l'aluminium chez Zea mays L.
 .Mémoire de D.E.A. ENSA Rennes.

ANGE A., 1984. Les contraintes de la culture cotonnière dans le système agraire de haute Casamance. Thèse de docteur-ingénieur, géologie appliquée, Paris INA Grignon 765 pages.

ARRIGNON J., 1987. Agro-écologie des zones arides et sub-humides.
 Editions Maisonneuve - 280 pages.

BANQUE MONDIALE, 1989. L'Afrique subsahélienne de la crise à une croissance durable.
 Etude et perspective à long terme.
 WASHINGTON DC. - 345 pages

BARLOY J. ,J. COMIN, J. MASTARI, J. LE PIERRES ET S. MINARD 1995. Influence de l'aluminium sur la morphogénèse du système racinaire ,la composition minérale des organes, la production de biomasse et l'acidité organique des racines. Rapport dans le cadre du programme STD3 CEE "Adaptation of maize to acids soils" 11 pages .

BARTLETT R.J. et D.C. RIEGO, 1972. Toxicity of hydroxy aluminium in relation to pH and phosphorus. Soil Sci. 114 : 194-201.

BECQUER T., 1991. Production endogène de protons par les cycles de l'azote et du soufre dans deux sapinières vosgiennes. Bilans saisonniers et incidence sur la toxicité de l'aluminium.
 Université de Nancy I. Thèse de docteur ingénieur.
 156 pages.

BERTRAND R. 1986. Les ressources en sol des régions soudano-sahéliennes. Montpellier IRAT
 23 pages.

BLAMEY P.F.C., D.G.EDWARDS, C.J. ASHER 1983. Effects of aluminium OH:Al molar ratios and ionic strength on soybean root elongation in solution culture. Soil Sci. Soc. Am. J. 50 : 1449-1454.

BLAMEY F.P.C., D.C. EDMEADES ,AND D.M.WHEELER . 1990 .Role root cation-exchange capacity in differential aluminium tolerance of lotus species. J. Plant. Nutr. 13 : 729-744 .

- BONNEAU M. et B.SOUCHIER, 1994. 2^{ème} édition sous la direction de PH. DUCHAUFOR. Pédologie. II Constituants et propriétés du sol. Edition MASSON - 665 pages.
- BRENNER C.. La biotechnologie et l'agriculture des pays en développement. Le cas du maïs. Centre de Développement Economique. 109 pages.
- BRUCE R.C., L.A. WARRELL ,L.C. BELL et D.G. EDWARDS, 1989 .Chemical attributes of some Queensland acid soils. I . Solid and solution phase composition. Australian J. of Soil Research 27: 333-351.
- BRUKERT S.,J. ROUILLER, 1994. Mécanisme de régulation du pH des sols dans Pédologie, II Constituants et propriété du sol M. BONNEAU, B. SOUCHIER.Ed Masson. P 511-522
- CALBA H., B. JAILLARD, P. FALLAVIER, J.C. ARVIEUX. Agarose as a suitable substrate for use in the study of Al dynamics in the rhizosphere. A paraître, 30 pages.
- CALLOT G., H. CHAMAYOU, C.MAERTENS, L.SALSAC, 1982. Les interactions sol-racines. Incidence sur la nutrition minérale. INRA-Paris. 325 pages.
- CAMBRAIA J., F.R. GALVANY, M.M. ESTEVAO AND R. SANT'ANNA .1983 Effets of aluminium on organic acid , sugar and amino acid composition of the root system of sorghum (sorghum bicolor L.).Journal of plant nutrition ,6 (4) ,313-332 .
- CAMERON R.S., G.S. RITCHIE et A.D. ROBSON, 1986. Relative toxicities of inorganic aluminium complexes to barley. Soil Sci. Soc Am. J. 50: 1231-1236.
- CATTAN P., R. SCHILLING, 1991. Les systèmes arachidiens dans les zones de savannes ouest-africaines. Savanes d'Afrique,terres fertiles .CIRAD .Publication du Ministère de la Coopération p 145-172 .
- CHARLOT G., 1966. Les méthodes de la chimie analytique. Analyses quantitatives minérales. Edition MASSON 5^{ème} édition -1020 pages.
- CHAMAYOU H., J.P.LEGROS, 1989. Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Edition Presses Universitaires de France. - 586 pages.
- CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. El Batan Mexico) 1994. Rapport dans le cadre du programme STD3 CEE "Adaptation of maize to acids soils ".23 pages
- CLARK R.B., 1982. Nutrient solution growth of sorghum and corn in mineral nutrition studies. Journal of Plant Nutrition 5:1039-1057
- CLARK R.B., 1987 . Effect of aluminium on growth and mineral elements of AL tolerant and Al intolerant Corn .Plant and Soil (47) ,653-662 .
- CLERGER B. 1995.La tolérance variétale aux sols acides : une des clés pour le développement agricole durable des régions tropicales. Note interne CIRAD-CA, 24 pages.

COPPENET M., C. JUSTE 1994. Les oligo-éléments chez les plantes, carences et toxicités, dans Pédologie II: Constituants et propriétés du sol. BONNEAU M., B. SOUCHIER. Ed. Masson. p579-582.

CROMACK K., P. SOLLINS, W.C. GRAUSTEIN, 1979. Calcium oxalate accumulation and soils wathering in mats of the hypogeous fungus *hysterangium crassum*. Soil Biol. Biochem. vol 11, p 463-468.

DANCETTE C., 1984. Contrariétés pédoclimatiques et adaptation de l'agriculture à la sécheresse en zone intertropicale. Dans: La sécheresse en zone tropicale. Pour une lutte intégrée. Actes du colloque "Résistance à la sécheresse en milieu intertropical: quelles recherches pour le moyen terme ?". Dakar, SENEGAL, 24-27 septembre, Paris, CIRAD-CILF: 27-41.

DECKERS J., 1993. Fertilité du sol et problèmes d'environnement dans différentes zones écologiques des pays en développement de l'Afrique sub-saharienne. Dans: Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable des cultures vivrières en Afrique sub-saharienne de REULER et PRINS, pages 41-59.

DELHAIZE E., P.R. RYAN AND P.J. RANDALL. 1993. Aluminium tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) II. Aluminium-stimulated excretion of malic acid from root apices. Plant. Physiol. 103 : 695-702.

DUCHAUFOR Ph., B.SOUCHIER, 1983. Pédogénèse et classification. Edition Masson 2^{ème} édition - 470 pages.

DUCHAUFOR Ph., 1991. Pédologie sol, végétation, Environnement. Editeur MASSON 3^{ème} édition - 290 pages

DUQUE-VARGAS J., S. PANDEY AND CO. 1994. Inheritance of tolerance to soil acidity in tropical maize. Crop Sci. 34 : 50-54.

EDMEADES D.C., D.M. WHEELER, O.E. CLINTON 1985. The chemical composition and ionic strength of soil solutions from New Zealand topsoils. Australian J. of Soil Research 23: 151-165.

ESPIAU P., 1994. Le complexe absorbant. Pédologie II: Constituants et propriétés du sol. BONNEAU M., B. SOUCHIER. Ed. Masson. p 489-510

FALLAVIER P., D. BABRE, M. BREYSSE, 1985. Détermination de la capacité d'échange cationique des sols tropicaux acides. L'Agronomie Tropicale 40-4: 298-307

FALLAVIER P., D.BABRE, A.AVENTURIER, F. BARTOLI, R.PHILIPPY. 1988. Caractérisation et évolution du statut de l'aluminium des sols tropicaux acides. URA -CIRAD Montpellier / CPB Nancy. 105 pages.

FALLAVIER P., B. BABRE, 1990. Statut de l'aluminium dans deux sols tropicaux acides à minéralogie différenciée. Dans: Agronomie et Ressources naturelles en régions Tropicales. Editeur IRAT Montpellier pages 247-254.

FALLAVIER P., et coll. 1994. Spéciation et modèles physico-chimiques .Lettre de l'URA n°8. CIRAD. 7 pages .

FALLAVIER P., D. BABRE, M. BREYSSE, P. CAZEVIELLE 1995 .a.
Résultats d'analyses de sols du Brésil (CURITIBA). Rapport dans le cadre du programme STD3 CEE "Adaptation of maize to acids soils ".13 pages .

FALLAVIER P., D. BABRE, M. BREYSSE, P. CAZEVIELLE 1995 .b.
Résultats d'analyses de sols du Cameroun ,NKOLBISSON ET NKOEMVONE. Rapport dans le cadre du programme STD3 CEE "Adaptation of maize to acids soils ".23 pages .

FALLAVIER P., D. BABRE, M. BREYSSE, P. CAZEVIELLE 1995 .c.
Résultats d'analyses de sols de GUADELOUPE site N° 1 . Rapport dans le cadre du programme STD3 CEE "Adaptation of maize to acids soils ".12 pages .

FALLAVIER P., D. BABRE, M. BREYSSE, P. CAZEVIELLE 1995 .d.
Résultats d'analyses de sols de GUADELOUPE domaine de DUCLOS (INRA). Rapport dans le cadre du programme STD3 CEE "Adaptation of maize to acids soils ".12 pages .

FALLAVIER P., D. BABRE, M. BREYSSE, P. CAZEVIELLE 1995 .e.
Présentation de résultats relatifs à la toxicité aluminique de quatre sols tropicaux, 14 pages.
Communication dans le cadre du programme STD3 CEE "Adaptation of maize to acids soils ".

FALLAVIER P., 1995 .f. Physico-chimie des sols tropicaux. A paraître.

FAO 1993. Le maïs dans la nutrition humaine. 174p

FOY,C.D., A.L. FLEMING, G.C. GERLOFF, 1972. Differential aluminium tolerance in two snapbean varieties. Agronomy Journal 64:815-818.

FOY C.D., R.L.CHASSEY 1978 . The physiology of metal toxicity in plants .Am. Rev. Plant Physiol. 29 :511-566 .

FOY C.D., A.L. FLEMING 1982 . The physiology of plant tolerance to excess available aluminium and manganese in acid soils .p 301-328 ,in G.A.Jung(ED),Crop tolerance to sub optimal land conditions Spec Pub n° 32 ,Am. Soc. of Agron. Madison Wis.

FOY C.D., 1984 . Physiological Effects of Hydrogen ,Aluminium ,and Manganese Toxicite in Acid Soil p 57-97 , dans " Soil acidity and Liming " Edité par F.Adams 380 pages.

FOY C.D., 1988 .Plant adaptation to acid ,aluminium-toxic soils.
Soil Sci. Plant Anal 19 : 959-987 .

FOY C.D., E.H. LEE, C.A. CORADETTI AND G.J. TAYLOR 1990 . Organic acids related differential aluminium tolerance in wheat (triticum aestivum) cultivars. Plant nutrition-physiology and applications: 381-389.

FOY C.D.,1991 . Role of the soil scientist in genetic improvement of plant for problem soils.
"Rencontres internationales de Beckley".

- FUSELLIER J-L., 1991. La filière maïs en Côte d'Ivoire.
Thèse de doctorat en économie rurale et agro-alimentaire Université de Montpellier I -303 pages
- GALVEZ L., R.B. CLARK, L.A. KLEPPER AND L. HANSEN 1991 . Organic acids and free proline accumulation and nitrate reductase activity in sorghum (sorghum bicolor) genotypes differing in aluminium tolerance .Plant-soil interactions at low pH .Kluwer Academic Publishers : 859-867 .
- GAY J.P. 1983. Le cycle du maïs. Communication au colloque "Physiologie du maïs". INRA, CNRS ,AGPM .A. GALLAIS Coordinateur. 1-12.
- GAY J.P., D. BLOC 1983. Détermination des composantes du rendement en grain. Communication au colloque "Physiologie du maïs". INRA ,CNRS ,AGPM .A. GALLAIS Coordinateur. 181-192.
- GAY J.P., 1984. Fabuleux maïs.
Edition AGPM - 290p
- GIRARDIN P. 1990 . De l'ovule au grain de maïs mature .Physiologie et production du maïs. Communications au colloque "La vie du maïs". INRA , AGPM .D. Picard Coordinateur .187-200.
- GRANADOS G., S. PANDEY ,AND H. CEBALLOS 1993. Reponse to selection for tolerance to acid soils in a tropical maize population . Crop Sci. 33 : 936-940 .
- GODEFROY J., M. DORMOY 1990. Simulation de l'action du chaulage sur le pH et les teneurs en aluminium et manganèse dans un ferrisol de Martinique .Fruits vol 45.3 : 219-222 .
- GREENLAND D.J., 1981. Characterisation of soils in relation to their classification and management for crop production. Examples of some area of the humids tropics.
Edité par l'auteur - 430 pages
- GRIFFON M., 1990 . Quels défis agricoles pour les 25 prochaines années .Savanes d'Afrique , terres fertiles .CIRAD .Publication du Ministère de la Coopération p 27-41 .
- HAILU Z. and A.RUNGE-METZGER, 1993. Sustainability of land use systems. The potential of indigenous measures for the maintenance of soil productivity in Sub-Sahara agriculture
Edité par V.J. MARGRAF - 168 pages
- HARIAH K., I. STULEN, P.J.C. KUIPER 1990. Aluminiumtolerance of the velvet beans. Effects of aluminium on growth and mineral composition. Plant nutrition-physiology and applications.Kluwer Academic Publishers.Netherlands. p 365-374.
- HELLER R., R. ESNAULT, C. LANCE. 1993. Physiologie végétale I Nutrition .Edité par Masson . 293 pages .
- HOAGLAND R.D., D.I. ARNON 1950. The water culture method for growing plants without soil. Calif. Agr. Stn Circ. p347
- HORST W.J., A. WAGNER, and H. MARSCHNER. 1982 . Mucilage protects root meristems from aluminium injury . Z. Pflanzenphysiol. 105:435-444 .

HUANG P.M. 1988. Ionic factors affecting aluminium transformations . Adv. in Soil Sci. 8 : 1-78.

HUE N.V., G.R. CRADDOCK, and F. ADAMS 1986. Effect of organic acids on aluminium toxicity in subsoils .Soil Sci. Soc. Am. J. vol 50 ,28-34 .

ISLAM A.K.M.S., D.G. EDWARDS, and P.H. ASHER 1980. pH optima for crop growth. Result of a flowing solution culture experiment with six species. Plant and Soil, 54 339-357.

JACQUOT M., B. COURTOIS, 1983. Le riz pluvial. Ed. Maisonneuve; 140 pages.

JOHNSON A.K.C., 1994. Les ressources agro-minérales en afrique de l'ouest: inventaire et valorisation. Séminaire régional IFDC-AFRIQUE sur l'emploi des ressources minérales locales pour une agriculture durable en Afrique de l'Ouest. Lomé TOGO 21-23 novembre 1994.

KAMPRATH E.J. 1984. Crop reponse to lime on soil on the tropics. Dans: " Soil acidity and Liming " Edité par F.Adams, pages 349-366.

KENNEDY I.R., 1992. Acid soil and acid rain.
Editeur J.WILEY 2^{ème} édition - 253 pages

KERRIDGE P.C, 1969. Aluminium toxicity in wheat. Ph.D. thesis, Oregon State Univ. (Diss. Abstr. B29:3159)

KIEFT H., 1993. Potentiel d'une agriculture à peu d'intrants externes" en Afrique sub-saharienne. Dans, Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable des cultures vivrières en afrique sub-saharienne.p 141-156.

KINRAIDE T.B., D.R. PARKER 1989. Assessing the phytotoxicity of mononuclear hydroxy-aluminium. Plant Cell and Environnement: 12, 479-487.

KINRAIDE T.B., 1991. Identity of the rhizotoxic aluminium species, dans Plant-Soil Interactions at low pH, 717-728. Kluwer Academic Publishers Netherlands

LA DOCUMENTATION FRANCAISE, 1994. La planète terre entre nos mains
guide pour la mise en oeuvre des engagements du sommet
planète terre (rio de janeiro 1992) - 442 pages

Le CIRAD en 1991 . 1992 .Ouvrage publié par le Service central d'information scientifique et technique du CIRAD .123 pages.

LEE H. ,C.D. FOY 1986. Aluminium tolerance of two snapbean cultivars related to organic acid content evaluated by H.P.L.C.
J. of plant nutrition 9(12) : 1481-1498 .

LIMA M., P.R. FURLANI, J.B. MIRANDA FILHO 1992. Divergence selection for aluminium tolerance in a maize. Maydica 37: 123-137.

LINDSAY W.L.1979. Chemical equilibria in soils. J. WILEY.
NEW YORK 468 pages

LLUGANY M., N. MASSOT, A.H. WISSEMEIER, C. POSCHENRIEDER, W.J. HORST and J. BARCELO .1994. Aluminium tolerance of maize cultivars as assessed by callose production and root elongation. *Z Pflanzenernähr. Bodenk* 157 : 447-451

LLUGANY M., C. POSCHENRIEDER AND J. BARCELO 1995. Monitoring of aluminium induced inhibition of root elongation in four maize cultivars differing in tolerance to aluminium and proton toxicity .*Physiologia Plantarum* 93 :267-271

LOPEZ J. 1994. Extraction et dosage des acides organiques par chromatographie ionique dans les racines de maïs. Rapport stage ingénieur E.N.C.Montpellier. CIRAD. 64 pages.

LUND Z.F. 1970. The effect of Calcium and its relation to several cations in soybeans root growth. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* vol34 456-459.

MAGNAVACA R. ,A.F.C. BAHIA filho. 1993 . Success in maize acid soil tolerance. Communication "Rencontres internationales Berkeley". Pages 209-220.

MAKKEN F. 1993. Vue d'ensemble du secteur agricole en Afrique sub-saharienne, dans, Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable des cultures vivrières en Afrique sub-saharienne, de H. V. REULER et W. H. PRINS. Pages 29-41.

MARSCHNER H., 1991 . Mechanisms of adaptation of plants to acids soils .*Plant and Soil* 134 :1-20 .

Mc LAY C.D.A., G.S.P. RITCHIE, W. M. PORTER and A. CRUSE 1994. Amelioration of subsurface acidity in sandy soils in low rainfall regions. II Changes to soil solution composition following the surface application of gypsum and lime. *Australian J. of Soil Research* :22 847-865.

Mc LEAN E.O., M.R. HEDDELESON, G.J. POST 1959. Aluminium in soils; III. A comparison of extraction methods in soils and clays. *Soils Sci. Soc. Am. J.* 23: 289-293.

Mc LEAN E.O. 1976. Chemistry of soil aluminium
Commun. Soil Sci. Plant Anal.: 7 , 619 -636 .

MELLOR J.W 1991. La croissance agricole en Afrique et en Asie. Démographie, urbanisation, pauvreté, interactions avec l'environnement. Collection Notes et Documents CIRAD .20 pages.

MINISTERE DE LA COOPERATION 1991. Mémento de l'agronome.
Collection "Techniques rurales en Afrique"
Edité par le Ministère de la Coopération 4^{ème} édition - 1620 pages

MINISTERE DE LA COOPERATION 1990. Savannes d'Afrique terres fertiles.
Actes des rencontres internationales 10-14 décembre 1990
Edité par le Ministère de la Coopération - 587 pages.

MOREL F., J. MORGAN 1972. A numerical method for computing equilibria in aqueous chemical systems. *Environ. Sci. Tech.* 6: 58-67.

- MUGWIRA L.M., S.M. ELGAHARY, K.I. PATEL 1976. Differential tolerances of triticale, wheat, rye and barley to aluminium in nutrient solution. *Agronomy Journal* 68: 782-787.
- PANDEY ,S. and C.O. GARDNER. 1992. Recurrent selection for population, variety, and hybrid improvement in tropical maize.
Adv.agron. 48 :1-87 .
- PANDEY S, H. CEBALLOS, R. MAGNAVACA and co. 1994. Genetics of tolerance to soil acidity in tropical maize . *Crop Sci.* 34:1511-1514 .
- PEDRO G., 1994. Les minéraux argileux, les conditions de formation des constituants secondaires, dans *Pédologie II, constituants et propriétés du sol* M. BONNEAU, B. SOUCHIER, pages 47-74.
- PICHOT J.,1981. Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques. *L'Agronomie Tropicale*,36 (2) : 122-133.
- PIERI C., 1987. Les problèmes, de l'industrie des engrais phosphatés et du développement de la fertilisation en Afrique.
rapport CIRAD-CA - 33 pages.
- PIERI CH., 1989. Fertilité des terres de savannes
Edité par le Ministère de la Coopération - 444 pages
- PIERI ,C., 1990. Les bases agronomiques de l'amélioration et du maintien de la fertilité des terres de savannes au sud du Sahara.
Savanes d'Afrique ,terres fertiles .CIRAD. Publication du Ministère de la Coopération p 43-74.
- PINTRO J.,1995 .a. Effets de la toxicité d'aluminium sur les plantules de maïs (*Zea mays* L.)cultivées dans une solution nutritive avec faibles valeurs de force ionique et d'activité d'Al.I. Discrimination de la sensibilité /tolérance sur deux variétés du maïs. A paraître .
- PINTRO J.,1995 .b. Effets de la toxicité d'aluminium sur les plantules de maïs (*Zea mays* L.)cultivées dans une solution nutritive avec faibles valeurs de force ionique et d'activité d'Al.II. Compartimentation d'Al dans l'apex de la racine principale . A paraître .
- PIOMBO G., 1994. Méthodologie d'extraction et dosage par I.C. de l'oxalate de calcium en sols calcaires et dans le micro environnement de racines mycorhizées.
Certificat d'études supérieures d'agronomie. INRA. ENSA. CIRAD. 40 pages.
- ROUANET G., 1984. Le maïs.
Ed Maisonneuse - 141 pages
- ROUX L., C. LESAIN 1959. Mise au point d'une technique de détermination des acides organiques chez les végétaux.*Physiologie végétale* I : 83-91.
- RUSKIN F.R., 1988. Quality - protein Maize. Board on Science and Technology for International Development. Publications and Information Services. Office of International - Affairs . National Research Council. Washington DC 20418 USA.

SCHREINER K.A., J.HODDINOTT and G.J. TAYLOR. 1994 .Aluminium-induced deposition of (1.3) glucans (callose) in *Tricunum eastivum* L . Plant and soil 162 : 273-280 .

SIMMONDS N.W., 1988 . Principes d'amélioration génétique des végétaux . Editeur Presses de l'Université Laval Québec. 406 pages.

SPOSITO G., S.V. MATTIGOD 1980. GEOCHEM: a computer program for the calculation of chemical equilibria in soil solutions and other natural water systems. The Kearney Foundation of Soil Sci. Univ. of California. 92 pages.

SPOSITO G., 1989. The environmental chemistry of aluminium, C.R.C. Press. Inc. BOCA RATON FLORIDA. 317 pages .

STAI P.P., P.H. HSU 1984. Studies of aged OH-Al Solutions using kinetics of Al-ferron reactions and sulfate precipitation. Soil Sci. Soc. Am.J. 48:59-65.

STEVENSON F.J. 1982. Humus chemistry John Willey New York.

SUMNER M.E., E. CARTER, 1988. Amélioration of subsoil acidity. Commun. in Soil Sci. Plant. Anal. 19(7-12) 1309-1318 .

SUHAYSA G.C., A. HAUG 1986. Organics acids reduce aluminium toxicity in maize root membranes. Physiol. Plant. 68 :189-195.

SUTHIPRADIT S., D.G.EDWARDS and C.J. ASHER ,1990. Effects of aluminium on tap-root elongation of soybean (*glycine max*), cowpea (*vigna unguiculata*) and green gram (*vigna radiata*) grown in the presence of organic acids. Plant nutrition-physiology and applications . 375-379.

TAYLOR G.J. 1988. The physiology of aluminium tolerance in higher plants. Commun. in Soil Sci. Plant Anal.,19 (7-12), 1179-1194 .

THE C., C. ZONKENG 1994. Contrat STD3. Adaptation du maïs aux sols acides Rapport annuel 1994. Cameroun. 17 pages.

THENG B.K.G. 1979. Formation and properties of clay-polymers complexes. Elsevier Amsterdam.

TRUONG B., C. FAYARD, 1993. Etude de préfaisabilité pour une production d'engrais au Mali à partir des phosphates de Tilemsi. Rapport d'étude CIRAD-CA TECHNIFERT S.A. - 127 pages.

TRUONG B., C. FAYARD, 1994. Petites unités de production d'engrais, à base de phosphates bruts et partiellement solubilisés - 32 pages
Séminaire régional IFDC-AFRIQUE sur l'emploi des ressources minérales locales pour une agriculture durable en AFrique de l'Ouest. Lomé TOGO 21-23 novembre 1994.

TRUONG Binh, 1994. Effets amendements des phosphates naturels. 9 pages.
Séminaire régional IFDC-AFRIQUE sur l'emploi des ressources minérales locales pour une agriculture durable en AFrique de l'Ouest. Lomé TOGO 21-23 novembre 1994.

TRUONG THI NGA, 1985. Effet de l'aluminium sur la croissance et l'absorption des éléments minéraux chez le riz (*oryza sativa* L.)

Thèse en sciences agronomiques, Université Catholique de LOUVAIN - 106 pages

UEHARA G., and G. GILLMAN, 1981. The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays

westview press - 170 pages

UEHARA G., B.B. TRANGMAR and YOST R.Y. 1985.

Spatial variability of soil properties. pages 61-96

dans *Soil Spatial Variability* 30.11-01.12 1984 LAS VEGAS.

Editeur D.R. NIELSEN J. BOUMA.

VAN DER POL F. 1993. Analyse et évaluation des options en vue d'une agriculture durable, cas particulier du sud Mali. Dans, *Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable des cultures vivrières en Afrique sub-saharienne*. Pages 77-99

VAN REULER H., W.H. PRINS, 1993. *Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable de cultures vivrières en Afrique sub-saharienne*

Edité par les auteurs - 250 pages

WAGATSUMA T., M. KANEKO 1987. High toxicity of hydroxy-aluminium polymer ions to plant roots. *Soil Sci. Plant. Nut.* 33 (1) 57-67.

WAGATSUMA T., M. KANEKO AND Y. HAYASAKA 1987. Destruction process of plant root cells by aluminium. *Soil Sci. Plant. Nut.* 33 (2) 161-175 .

WHITTEN M.G., RITCHIE G.S.P. 1991. Soil tests for aluminium toxicity in the presence of organic matter : laboratory development and assessment. *Comm. In soil Sci and Plant Analysis* 221 (3-4) : 343-368.

WISSEMEIER A.H., A. DIENING, A. HERGENRODER, W.J. HORST, 1993. Callose formation as parameter for assessing genotypical plant tolerance of aluminium and manganese. *Genetic aspects of plant mineral nutrition*, 81-89 .Kluwer Academic Publishers. Netherlands.

YONG R.N., M.O. MOHAMED and B.P. WARKENTIN, 1992. *Principes of contaminant transport in soil*.

Edition Elsevier - 327 pages

ZHANG G., J. HODDINOTT, G.J. TAYLOR 1994. Characterization of

1,3-D-glucan (callose) synthesis in roots of *triticum aestivum* in response to aluminium toxicity. *J. Plant Physio.* vol 144 p229-234.

ANNEXES

Composition minéralogique des argiles

Exemple de la kaolinite

Les composés minéraux argileux sont formés de différents feuillets élémentaires, composés d'oxydes et d'hydroxydes dont l'assemblage définit le type de modèle (X, Y, Z). Ils sont disposés dans des plans parallèles à l'intérieur desquels vont se loger les cations de l'édifice. La maille de la kaolinite est formée de trois feuillets assemblés les uns aux autres :

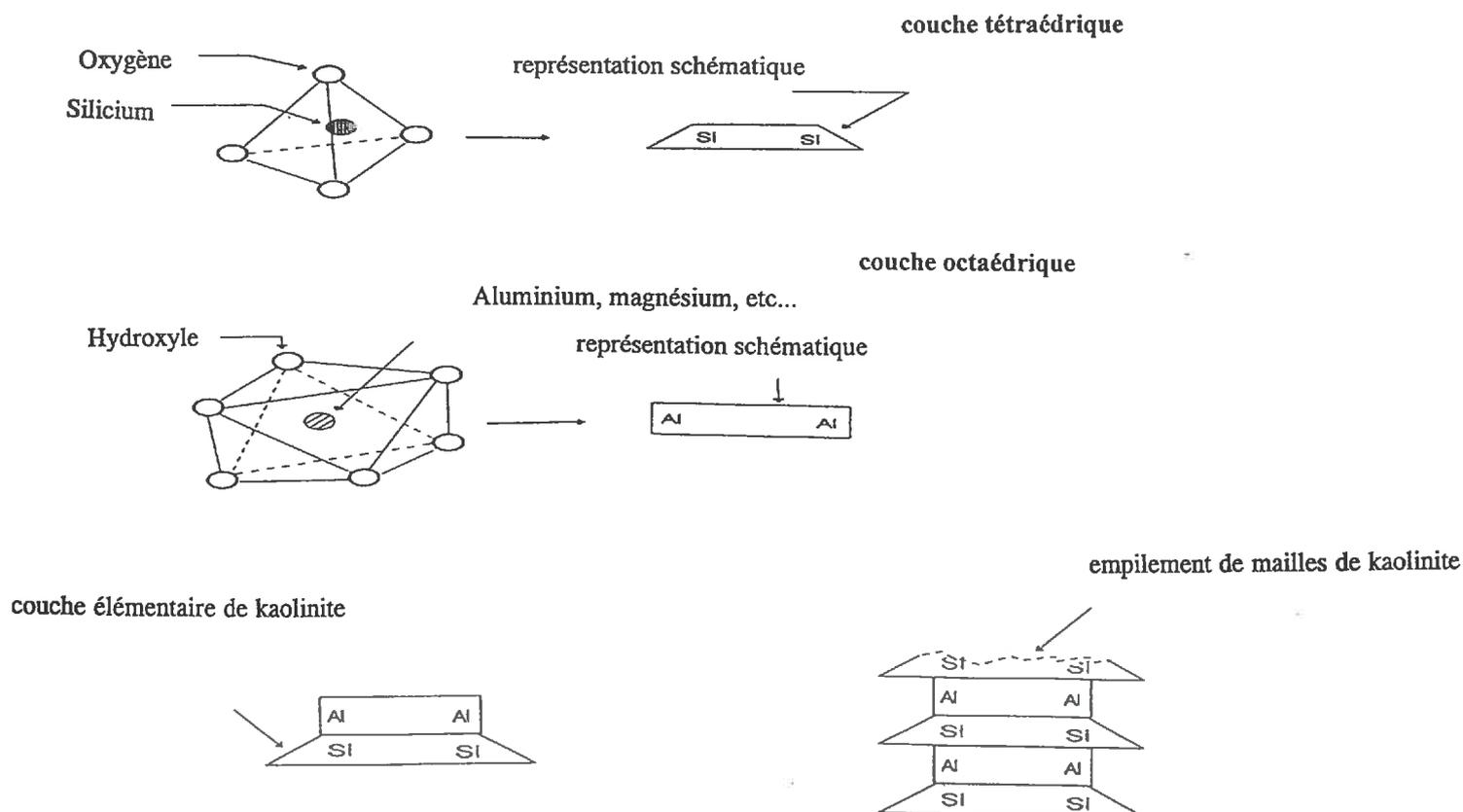
- ✓ X, Y perpendiculairement, forment une couche tétraédrique
- ✓ Y, Z compactés définissent une couche octaédrique.

Chaque couche renferme respectivement du silicium et de l'aluminium .

Les cavités résultant des assemblages des couches tétraédriques et octaédriques des argiles sont remplies par des cations dont la charge assure la neutralité de l'édifice.

Des substitutions isomorphiques de cations de tailles voisines mais de nature différente peuvent s'effectuer de manière naturelle. La substitution hétérovalente ne maintient pas l'électroneutralité; la compensation des charges est réalisée au sein de l'édifice par des cations monohydratés (cas des micas), hydratés (argiles 2/1 par exemple), ou par des groupements cationiques plus ou moins polymérisés. Ces cations sont logés entre les argiles constituées de feuillets de type 2/1.

La structure de la kaolinite (figure proposée par YONG et al 1992), feuillet de type 1/1, simple, neutre et alumineuse dont la composition globale d'une maille simple peut s'écrire : $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$, ne favorise pas les substitutions isomorphiques (GREENLAND 1981), de plus, elle conduit à une faible capacité d'échange cationique (BONNEAU, SOUCHIER 1994).



Représentation schématique des couches et d'une maille élémentaire de kaolinite

Propriétés d'échange des sols : la Capacité d'Echange Cationique

Les propriétés d'échange d'un sol sont définies par son aptitude à prélever ou à fournir des ions. Elles sont fonction des caractéristiques physico-chimiques du sol. Le complexe absorbant est composé, d'une manière simplifiée, d'un ensemble colloïdal capable d'adsorber et d'échanger des cations. Les colloïdes sont formés d'argiles, de cations minéraux, et de matière organique. Le complexe d'échange est porteur de charges électriques négatives; l'électroneutralité de l'ensemble est atteint par l'adsorption des cations échangeables contenus dans le milieu. La capacité d'échange cationique (CEC) mesure l'ensemble des charges négatives neutralisées par les cations échangeables.

La mesure de la capacité d'échange cationique (CEC), est obtenue en déplaçant les cations échangeables.

L'étude du complexe absorbant (C.E.C. et cations échangeables) est importante pour apprécier les réserves minérales en cations basiques (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+), accessibles aux cultures. Dans le cas des sols acides, elle permet aussi de connaître la proportion des cations Al^{+++} , Mn^{++} et H^+ qui peuvent être responsables des risques de toxicité pour les plantes (ESPIAU 1994, FALLAVIER 1995).

* origine des charges

D'un point de vue théorique, l'élaboration de modèles aboutit à l'établissement d'équations qui permettent de décrire l'interaction de la surface électriquement chargée avec les électrolytes. Ils supposent que les ions, au voisinage de la surface sont répartis en couches successives parallèles.

A chaque couche correspond un mécanisme différent d'adsorption ou de rétention des ions et une densité de charge propre. Il y a lieu de distinguer :

- ✓ les ions déterminant le potentiel (IDP), qui appartiennent au solide; les ions H^+ et OH^- sont les IDP les plus courants.
- ✓ les ions adsorbés spécifiquement (IAS); ils forment une liaison covalente avec les groupes fonctionnels de la surface et constituent la couche compacte.
- ✓ les ions indifférents composent la couche diffuse et équilibrent la charge électrique globale afin de respecter l'électroneutralité de l'ensemble.

Chaque catégorie d'ions contribue à la densité de charge du complexe.

Suivant le type de colloïdes minéraux contenus dans le sol nous pouvons distinguer :

- ✓ les charges permanentes, composées des cations basiques Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++} contenus dans les édifices élémentaires et assurant l'électroneutralité de l'ensemble
- ✓ les charges variables provenant de la dissociation de la matière organique liée à l'augmentation du pH de la solution du sol.

Modes de cultures en régions tropicales

Cultures extensives

Les pratiques culturales antérieures font référence à la culture sur brulis, après déforestation, suivie de plusieurs années de jachère. Cette technique permet de maintenir, dans les zones tropicales des sols à un niveau de fertilité très moyen mais stable (PIERI 1989).

Cette culture extensive avec de longues périodes de jachère ne suffit plus à subvenir aux besoins alimentaires des populations concernées.

Les périodes de jachère sont écourtées et seules les premières années de cultures sont rentables. Sans restitutions minérales et organiques, les pertes de rendement provoquent l'abandon des terres rendues incultes pour une période de 10 à 15 ans.

Sur les terres cultivées après défrichement de savanes arborées, les rendements chutent encore plus rapidement et les terres sont abandonnées seulement après 5 ou 6 ans de cultures.

Les sols dégradés par des cultures antérieures ne retrouvent pas leur fertilité première.

Une fumure organique permet de générer une culture rentable seulement pendant la première année d'exploitation.

Les cultures pérennes de front pionnier (café, cacao, palmier) ont des difficultés à s'étendre encore; la déforestation doit être gérée et n'est pas extensible sans risque majeur de désertification. Les anciens vergers sont économiquement défailants, la replantation se heurte à des coûts élevés, la perte de fertilité des sols et la destruction des circuits de valorisation ne favorisent pas l'émergence d'une productivité rentable.

Cultures semi-extensives

La monoculture céréalière a toujours appauvri les sols.

Les rendements en forte baisse dès les premières années ont amené les paysans à pratiquer la rotation des cultures qui maintient la fertilité à un seuil viable à condition d'adopter des pratiques culturales basées sur l'adjonction aux sols de fumures minérales et organiques.

L'association, par exemple : assolement, céréales (mil, sorgho ou maïs) et arachides, a été étudiée sur une vingtaine d'années dans le bassin arachidier sénégalais (Darou) et au Burkina Faso (Niangoloko) (R. CATTAN, R. SCHILLING 1990).

Sur ces sols acides (pH compris entre 4.9 et 5.6 pour l'essai de Niangoloko), l'arachide, culture commerciale et aussi vivrière, plante rustique s'adaptant sur ces terres peu fertiles, reste une source d'amélioration agronomique.

En rotation avec une céréale, l'arachide n'évite pas une baisse de rendement à court terme. Seule une restitution minérale, après une jachère de bonne qualité (brulée), associée à une fumure organique, par exemple l'enfouissement des fanes de plants d'arachides, assurent des rendements céréaliers sans épuiser le sol. Ces techniques sont les plus fréquentes, mais restent difficiles à rentabiliser pour l'exploitant non encadré et ayant des difficultés d'approvisionnement en intrants minéraux. Elles apportent des rendements faibles, 500 kilogrammes par hectare, mais stabilisent la fertilité des sols pour 30 à 50 ans en dépit des aléas climatiques (PIERI 1989).

D'autres pratiques culturales semi-extensives sont adaptées sur ces terrains tropicaux. Citons le système agro-forestier, où les espèces arbustives sont intégrées dans la surface cultivable. Cette technique maintient la fertilité du sol, évite l'érosion et amène une production d'appoint (fruits, fourrage).

Certains effets négatifs sont liés à l'utilisation de ces techniques : la couverture arborée puise dans le sol au détriment des cultures une partie des éléments nutritifs, l'eau, et partage la lumière avec les cultures.

D'autres systèmes entraînent des améliorations de rendements avec un apport d'intrants faibles. Citons la culture en bandes, où les cultures vivrières sont plantées entre les rangées de légumineuses arbustives à enracinement profond, ainsi que des systèmes intégrant des améliorations techniques, comme des brise vents ou l'établissement de banquettes afin de contrôler l'érosion.

La bonne gestion de ces systèmes semi-extensifs favorise une augmentation de la productivité et préserve la fertilité des terres (H.KIEFT 1993).

Cultures intensives

L'intensification des cultures des terres fertiles des régions tropicales semble être la seule réponse à l'essor démographique de ces pays. Elle s'applique surtout aux cultures de rentes (coton, arachide, cacao) et peu souvent aux cultures vivrières (maïs).

L'exemple le plus caractéristique est la culture du coton en Afrique de l'Ouest. De 1955 à 1985, la production cotonnière est passée de 20 à 650 milliers de tonnes, les rendements de 180 à 1100 kilogrammes à l'hectare et la superficie de 10 à 800 milliers d'hectares cultivés.

Cette culture, améliorée au fil des ans par des avancées technologiques et agronomiques, outre l'occupation de l'espace et le flux migrant qu'elle provoque, nécessite des doses d'engrais soutenues et l'emploi d'une mécanisation importante. La conséquence la plus grave de cette intensification reste la destructuration du patrimoine foncier : épuisement de la matière organique, érosion accélérée (ANGE 1984).

Réactions chimiques d'acidification

✓ Réactions liées à l'utilisation d'engrais azotés :

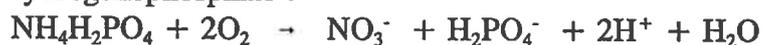
Nitrate d'ammonium :



Urée :



Ammonium dihydrogénophosphate :

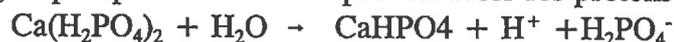


Sulfate d'ammonium :



✓ Autres réactions d'acidification:

L'apport de super phosphate de calcium dans le sol, en présence d'eau, schématisé par la réaction du di-hydrogénophosphate de calcium produit aussi des protons :



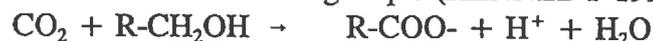
L'oxydation de la pyrite dans les sols sulfatés acides, en milieu inondé, constitue un cas particulier :



Pour des pH de l'ordre de 2.2, l'ion ferrique dans la solution du sol se trouve stabilisé dans une forme intermédiaire.



Notons aussi les réactions de formation des acides organiques, humiques et fulviques mis en solution par la minéralisation de la matière organique (KENNEDY 1992).



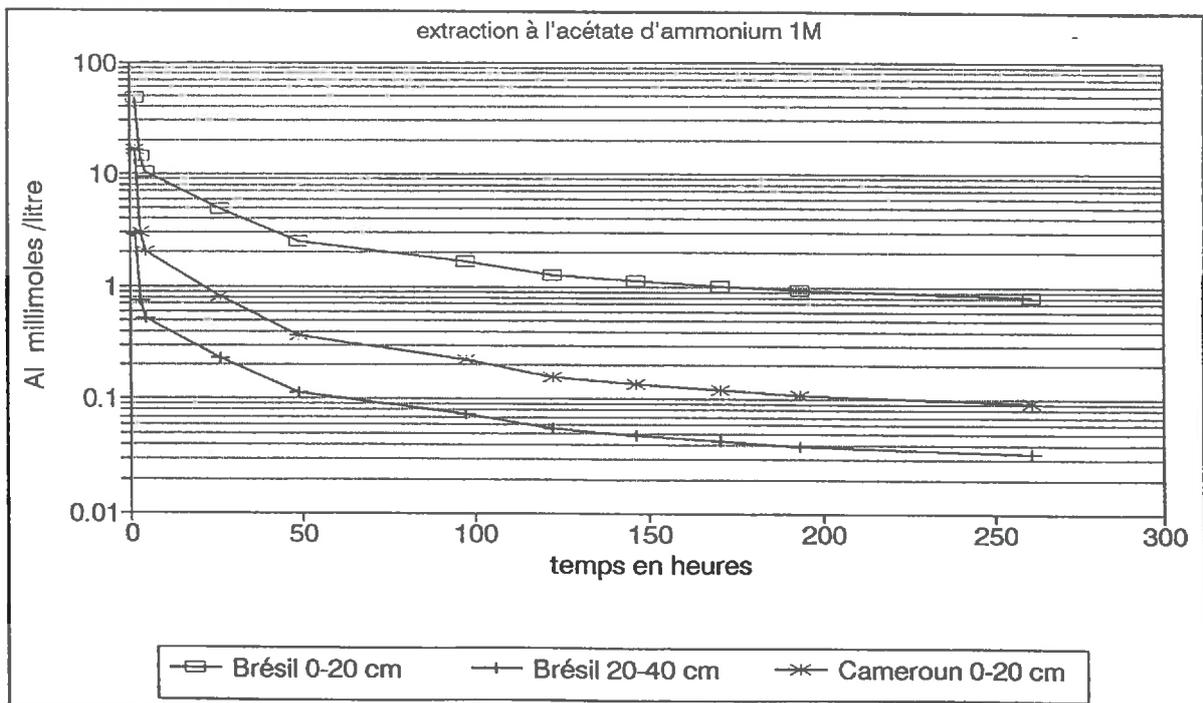
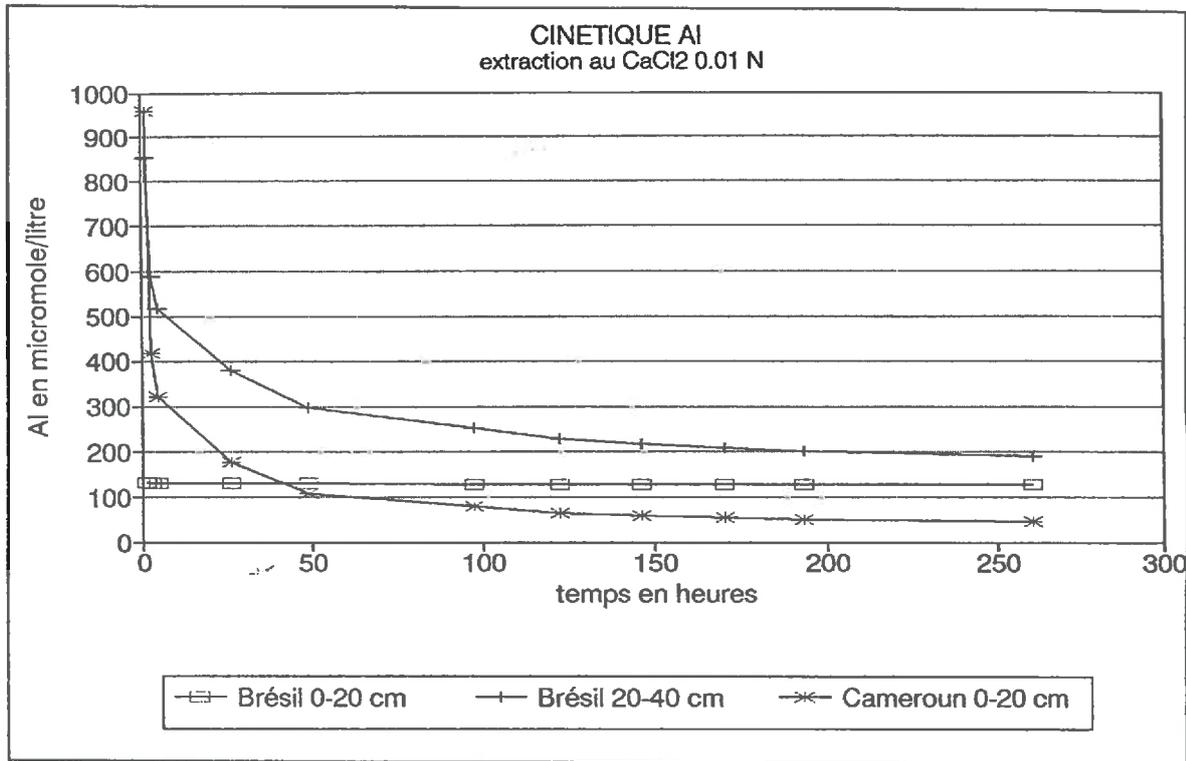
D'autres acides carboxyliques sont excrétés par les champignons ou les racines de plantes comme l'acide oxalique dans un système sol-plante mycorhizé (CROMACK et al 1979). Les acides carboxylés, de formule générale R-COOH, sont facilement dissociés en milieu aqueux et entretiennent l'acidification du milieu.

Cinétique de l'aluminium

Courbes : extraction au chlorure de calcium 0.01 N

Extraction à l'acétate d'ammonium 1M.

Tableaux : résultats expérimentaux - modélisation.



CINETIQUE ALUMINIUM

SOLUBLE A L'EAU (SOLUTION DU SOL)

SOL DU BRESIL 0-20 cm

RESULTATS EXPERIMENTAUX

temps heures t	volume	pH	[Al] micro g/l	Al cumulé micro g. q	Al micro g.
1.5	21.6	5.12	159.2	3.72	3.72
3	21.6	5.6	218.94	8.5	4.78
4.58	22.752	5.58	233.71	14.21	5.71
25.92	307.296	6.1	260.74	96.24	82.03
48.75	328.752	6.13	185.36	159.52	63.28
97.25	698.4	6.36	177.43	290.37	130.85
122.5	363.6	6.43	129.69	340.37	50
146.25	342	6.53	108.12	380.12	39.75
170.25	345.6	6.31	93.53	415.29	35.17
193.25	331.2	6.43	76.59	443.45	28.16
260.25	964.8	6.17	62.7	511.15	67.7

SOL DU BRESIL 20-40 cm

temps heures	volume	pH	[Al] micro g/l	Al cumulé micro g.	Al micro g.
1.5	21.6	4.15	51.11	1.1	1.1
3	21.6	4.64	14.3	1.39	0.29
4.58	22.752	4.8	16.94	1.77	0.38
25.92	307.296	6.32	20.58	7.68	5.91
48.75	328.752	6.22	23.72	15.11	7.43
97.25	698.4	6.02	88.63	75.13	60.02
122.5	363.6	6.09	54.91	94.5	19.37
146.25	342	6.09	72.18	118.73	24.23
170.25	345.6	5.95	47.66	135.03	16.3
193.25	331.2	5.92	31.28	145.47	10.44
260.25	964.8	6	24.71	169.63	24.16

SOL DU CAMEROUN 0-20 cm

temps heures	volume	pH	[Al] micro g/l	Al cumulé micro g.	Al micro g.
1.5	21.6	4.22	473.56	14.16	14.16
3	21.6	4.39	157.24	19.2	5.04
4.58	22.752	5.19	114.99	55.9	36.7
25.92	307.296	5.36	446.46	227.9	172
48.75	328.752	5.2	263.08	344.98	117.08
97.25	698.4	5.37	127.72	441.66	96.68
122.5	363.6	5.25	155.36	505.72	64.06
146.25	342	5.27	211.55	595.27	89.55
170.25	345.6	5.31	380.5	758.07	162.8
193.25	331.2	5.2	346.27	911.27	153.2
260.25	964.8	5.22	260.13	1025.92	114.65
287.17	387.648	5.42	385.55	1351.51	325.59

CINETIQUE ALUMINIUM

SOLUBLE A L'EAU (SOLUTION DU SOL)

SOL DU BRESIL 0-20 cm

MODELISATION

a=10[^]sec.mem.

Résultats :

log(t)	log(q)							
		Second membre	0.491003	3.097439	CUMUL			
		Err std de l'est. de Y	0.076074		Q MODEL		concentration	
		R carré	0.991422		A*T [^] B		$\mu\text{g/l}$	μM
0.176091	0.570543	Nombre d'observations	11		4.582008	4.582008	212.13	7.856667
0.477121	0.929419	Degrés de liberté	9		8.948774	4.366765	202.1651	7.487595
0.660865	1.152594	Coefficient(s) X	0.96571		13.46502	4.516251	198.4991	7.351817
1.413635	1.983356	Err std du coef.	0.029943		71.80656	58.34154	189.8545	7.031649
1.687975	2.202815				132.159	60.3524	183.5803	6.799271
1.98789	2.462952				257.4705	125.3115	179.4266	6.64543
2.088136	2.531951				321.7633	64.29279	176.8229	6.548995
2.165096	2.579921				381.8188	60.05552	175.6009	6.503739
2.231087	2.618351				442.1664	60.34757	174.6168	6.46729
2.28612	2.646845				499.725	57.55857	173.788	6.436591
2.415391	2.708548				666.1462	166.4212	172.493	6.388629

SOL DU BRESIL 20-40 cm

MODELISATION

a=10[^]sec.mem.

Résultats :

		Second membre	-0.37821	0.418587	Q MODEL		$\mu\text{g/l}$	μM
		Err std de l'est. de Y	0.166007		A*T [^] B			
		R carré	0.96846		0.650217	0.65	30.09259	1.11454
0.176091	0.041393	Nombre d'observations	11		1.380517	0.7303	33.81017	1.252229
0.477121	0.143015	Degrés de liberté	9		2.185886	0.805369	35.39772	1.311027
0.660865	0.247973	Coefficient(s) X	1.086215		14.36472	12.17883	39.63225	1.467861
1.413635	0.885361	Err std du coef.	0.065341		28.52916	14.16444	43.08548	1.595759
1.687975	1.179264				60.40336	31.87421	45.6389	1.69033
1.98789	1.875813				77.61584	17.21248	47.33904	1.753298
2.088136	1.975432				94.09038	16.47454	48.17118	1.784118
2.165096	2.07456				110.9752	16.88481	48.85652	1.809501
2.231087	2.13043				127.3512	16.37597	49.44435	1.831272
2.28612	2.162773				175.9622	48.611	50.38453	1.866094
2.415391	2.229503							

SOL DU CAMEROUN 0-20 cm

MODELISATION

a=10[^]sec.mem.

Résultats :

		Second membre	0.754772	5.685541	Q MODEL		$\mu\text{g/l}$	μM
		Err std de l'est. de Y	0.110026		A*T [^] B			
		R carré	0.975716		8.280974	8.28	383.3333	14.19753
0.176091	1.151063	Nombre d'observations	12		15.74929	7.468318	345.7555	12.80576
0.477121	1.283301	Degrés de liberté	10		23.31676	7.567464	332.6065	12.31876
0.660865	1.747412	Coefficient(s) X	0.927415		116.3584	93.04161	302.7752	11.2139
1.413635	2.357744	Err std du coef.	0.046267		209.0375	92.67913	281.912	10.44119
1.687975	2.537794				396.6156	187.5781	268.5826	9.947503
1.98789	2.645088				491.2921	94.67657	260.3866	9.643948
2.088136	2.70391				579.0465	87.75437	256.5917	9.503397
2.165096	2.774714				666.6758	87.6293	253.557	9.391
2.231087	2.879709				749.8123	83.13645	251.0158	9.296883
2.28612	2.959647				988.1903	238.378	247.0751	9.150928
2.415391	3.011113				1082.645	94.45455	243.6606	9.024467
2.458139	3.130819							

CINETIQUE ALUMINIUM

ECHANGEABLE (extraction CaCl₂ 0.01N)

SOL DU BRESIL 0-20 cm

temps heures	volume	pH	[Al] mg/l	Al cumulé micro g.	Al micro g.
1.5	21.6	3.95	2.66	56.97	56.97
3	21.6	4.17	4.58	146.87	89.9
4.58	22.752	4.2	5.21	264.56	117.69
25.92	307.296	4.06	5.28	1796.87	1532.31
48.75	328.752	4	4.3	3189.49	1392.62
97.25	698.4	4.15	3.34	5546.58	2357.09
122.5	363.6	4.22	2.55	6481.19	934.61
146.25	342	4.22	2.11	7221.4	740.21
170.25	345.6	4.16	1.8	7866.7	645.3
193.25	331.2	4.28	1.57	8412.22	545.52
260.25	964.8	4.26	1.31	9766.63	1354.41

SOL DU BRESIL 20-40 cm

temps heures	volume	pH	[Al] mg/l	Al cumulé micro g.	Al micro g.
1.5	21.6	3.71	12.81	290.4	290.4
3	21.6	3.86	26.46	841.42	551.02
4.58	22.752	3.91	29.14	1550.69	709.27
25.92	307.296	3.92	17.57	6793.22	5242.53
48.75	328.752	3.97	9.12	9683.32	2890.1
97.25	698.4	4.13	5.11	13137.5	3454.18
122.5	363.6	4.23	3.38	14314.49	1176.99
146.25	342	4.25	2.52	15150.47	835.98
170.25	345.6	4.21	2.11	15861.58	711.11
193.25	331.2	4.32	1.71	16426.8	565.22
260.25	964.8	4.35	1.4	17766.67	1339.87

SOL DU CAMEROUN 0-20 cm

temps heures	volume	pH	[Al] mg/l	Al cumulé micro g.	Al micro g.
1.5	21.6	3.73	9.33	264.5	264.5
3	21.6	3.67	9.21	557.01	292.51
4.58	22.752	3.63	8.11	3083.96	2526.95
25.92	307.296	3.72	4.69	4833.97	1750.01
48.75	328.752	3.92	2.58	5901.5	1067.53
97.25	698.4	4.03	1.41	698.89	-5202.61
122.5	363.6	4.7	0.92	7262.62	6563.73
146.25	342	4.13	0.71	7542.53	279.91
170.25	345.6	4.18	0.56	7666.05	123.52
193.25	331.2	4.2	0.46	7952.83	286.78
260.25	964.8	4.24	0.39	8120.07	167.24

CINETIQUE ALUMINIUM

ANNEXE 5

ECHANGEABLE (extraction CaCl₂ 0.01N)
MODELISATION

SOL DU BRESIL 0-20 cm

log(t)	log(q)		a=10 [^] sec.mem.	CUMUL q=a*t [^] b		concentration μg/l μM	
		Résultats :	51.3433				
0.176091	1.755646	Second membre	1.710484	76.87901	76.87901	3559.213	131.8227
0.477121	2.166933	Err std de l'est. de Y	0.091848	153.2944	76.41536	3537.748	131.0277
0.660865	2.422524	R carré	0.988273	233.5984	80.30402	3529.537	130.7236
1.413635	3.254517	Nombre d'observations		11	1312.078	1078.479	3509.578
1.687975	3.503721	Degrés de liberté		9	2460.956	1148.878	3494.666
1.98789	3.744025				4894.543	2433.587	3484.517
2.088136	3.811655	Coefficient(s) X	0.995643	6159.165	1264.622	3478.059	128.817
2.165096	3.858621	Err std du coef.	0.036152	7347.613	1188.449	3474.996	128.7036
2.231087	3.895793				8547.715	1200.101	3472.515
2.28612	3.924911				9697.117	1149.402	3470.417
2.415391	3.989745				13042.19	3345.076	3467.119

SOL DU BRESIL 20-40 cm

			a=10 [^] sec.mem.	CUMUL q=a*t [^] b		concentration μg/l μM	
		Résultats :	366.4518				
0.176091	2.462997	Second membre	2.564017	498.0728	498.0728	23058.93	854.0343
0.477121	2.925013	Err std de l'est. de Y	0.134718	841.6462	343.5734	15906.17	589.1175
0.660865	3.190525	R carré	0.957693	1159.305	317.6588	13961.8	517.1035
1.413635	3.832076	Nombre d'observations		11	4304.639	3145.334	10235.52
1.687975	3.986024	Degrés de liberté		9	6943.407	2638.768	8026.623
1.98789	4.118513				11710.23	4766.823	6825.348
2.088136	4.155776	Coefficient(s) X	0.756857	13945.62	2235.386	6147.925	227.7009
2.165096	4.180426	Err std du coef.	0.053026	15947.23	2001.614	5852.674	216.7657
2.231087	4.200346				17890.86	1943.63	5623.928
2.28612	4.215553				19691.68	1800.825	5437.272
2.415391	4.249606				24667.36	4975.679	5157.213

SOL DU CAMEROUN 0-20 cm

			a=10 [^] sec.mem.	CUMUL q=a*t [^] b		concentration μg/l μM	
		Résultats :	452.6804				
0.176091	2.422426	Second membre	2.655792	559.3207	559.3207	25894.48	959.0546
0.477121	2.745863	Err std de l'est. de Y	0.373894	802.9938	243.6732	11281.17	417.821
0.660865	3.489109	R carré	0.582704	1001.323	198.3288	8716.981	322.8512
1.413635	3.684304	Nombre d'observations		11	2473.454	1472.132	4790.598
1.687975	3.770962	Degrés de liberté		9	3438.987	965.5326	2936.963
1.98789	2.844409				4930.604	1491.617	2135.764
2.088136	3.861093	Coefficient(s) X	0.521713	5561.604	630.9998	1735.423	64.27493
2.165096	3.877517	Err std du coef.	0.147166	6100.297	538.6934	1575.127	58.33803
2.231087	3.884572				6603.581	503.2837	1456.261
2.28612	3.900522				7054.897	451.3153	1362.667
2.415391	3.90956				8240.113	1185.217	1228.458

CINETIQUE ALUMINIUM

LIBRE (extraction acétate d'ammonium 1M pH = 4.8)

SOL DU BRESIL 0-20 cm

temps heures	volume	pH	[Al] mg/l	Al cumulé mg	Al mg
1.5	21.6	4.43	1096	24.1	24.1
3	21.6	4.62	639.8	37.08	12.98
4.58	22.752	4.51	433.75	47.13	10.05
25.92	307.296	4.59	155.75	93.41	46.28
48.75	328.752	4.5	62.35	113.74	20.33
97.25	698.4	4.6	32.7	136.7	22.96
122.5	363.6	4.64	20.59	144.23	7.53
146.25	342	4.63	16.76	150.07	5.84
170.25	345.6	4.58	14.32	155.14	5.07
193.25	331.2	4.65	12.58	159.5	4.36
260.25	964.8	4.95	64.15	224.56	65.06

SOL DU BRESIL 20-40 cm

temps heures	volume	pH	[Al] mg/l	Al cumulé mg	Al mg
1.5	21.6	4.45	1226	28.36	28.36
3	21.6	4.55	760.37	44.54	16.18
4.58	22.752	4.48	482.46	55.98	11.44
25.92	307.296	4.58	153.82	102.37	46.39
48.75	328.752	4.5	56	120.55	18.18
97.25	698.4	4.6	30.95	141.92	21.37
122.5	363.6	4.62	21.51	149.62	7.7
146.25	342	4.62	18.02	155.75	6.13
170.25	345.6	4.58	15.62	161.15	5.4
193.25	331.2	4.65	13.56	165.73	4.58
260.25	964.8	4.93	7.36	172.95	7.22

SOL DU CAMEROUN 0-20 cm

temps heures	volume	pH	[Al] mg/l	Al cumulé mg	Al mg
1.5	21.6	4.9	229.87	7.11	7.11
3	21.6	5.03	93.59	10.28	3.17
4.58	22.752	4.93	25.17	18.82	8.54
25.92	307.296	4.89	8.47	22.26	3.44
48.75	328.752	4.83	5.06	24.1	1.84
97.25	698.4	4.91	3.28	26.69	2.59
122.5	363.6	4.91	2.53	27.78	1.09
146.25	342	4.95	2.16	28.74	0.96
170.25	345.6	4.92	2.02	29.64	0.9
193.25	331.2	4.82	2.01	30.56	0.92
260.25	964.8	4.74	1.53	31.26	0.7
287.17	387.648	4.77	1.74	32.45	1.19

Simulation GEOCHEM

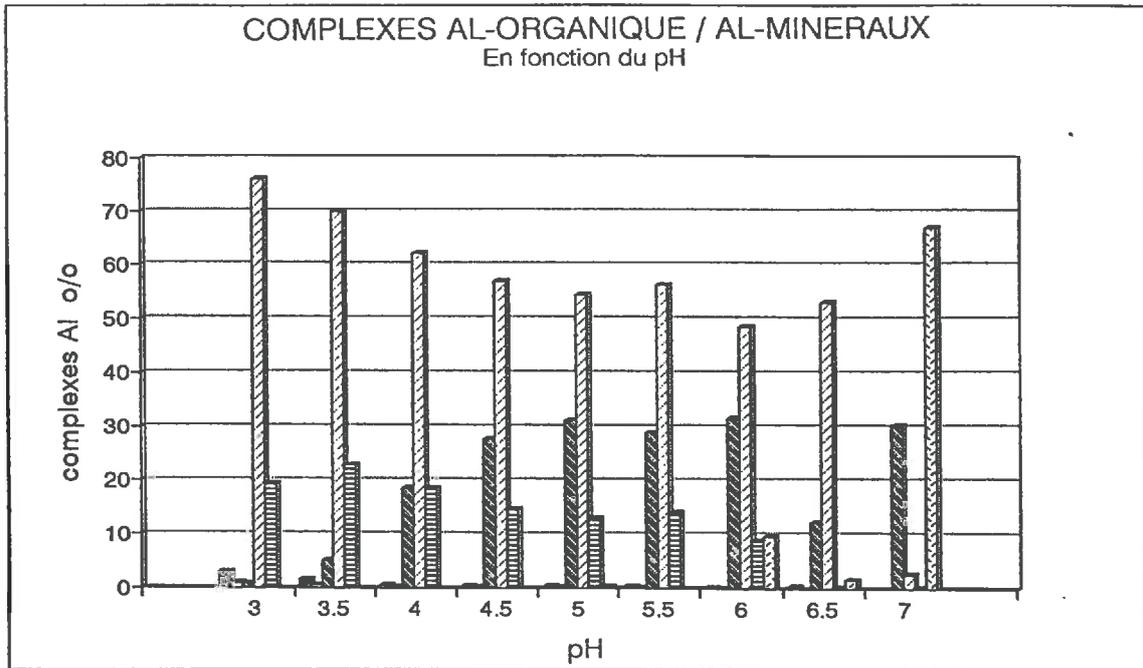


Figure 1 : Concentration en aluminium 30µM/L

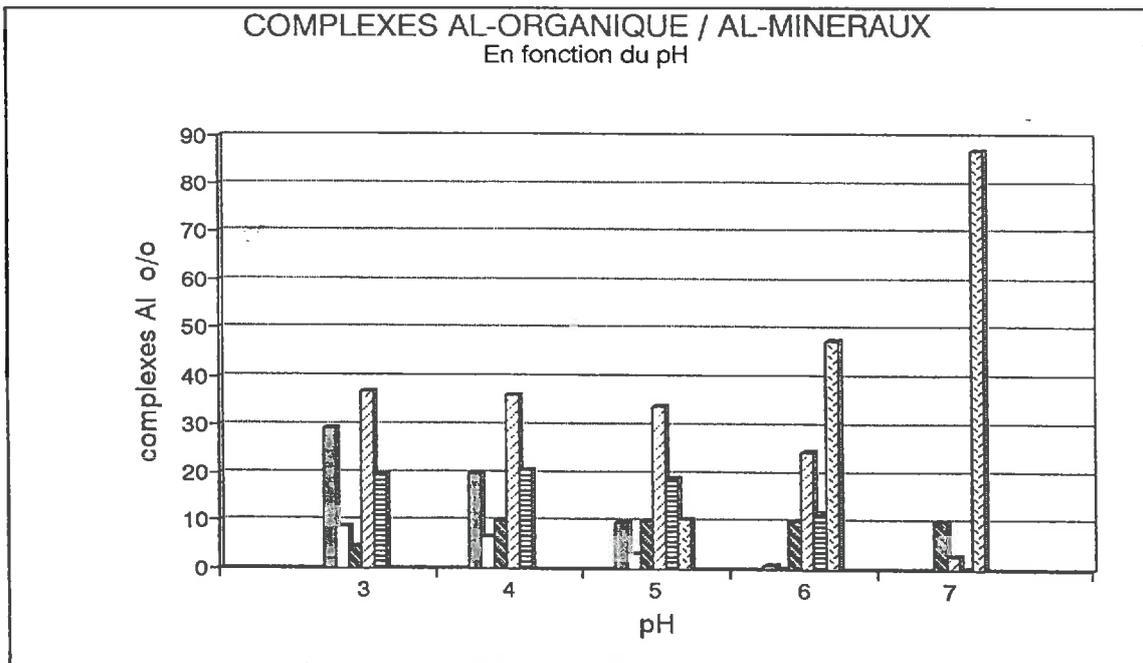
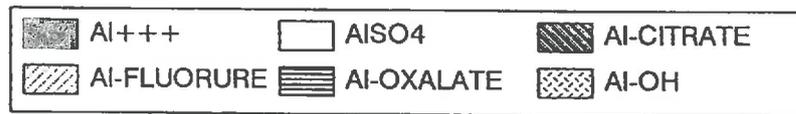
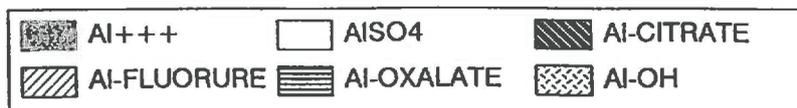


Figure 2: Concentration en aluminium 100µM/L



Echanges ca/al. Modélisation selon une equation de type langmuir

SOL AMBATOLAMPY : tableaux de résultats

Echanges Ca/Al . Modélisation selon une équation de type LANGMUIR.

	temoin	c1	c2	s1	s2	temoin	c1	c2	s1	s2
	Ca échangé					Al échangé				
2	0.29	1.07	2.32	0.58	0.78	0.48	0.13	0.06	0.32	0.22
4	0.38	0.44	0.82	0.85	1.13	0.36	0.27	0.16	0.17	0.11
6	0.37	0.39	0.48	0.69	1.11	0.33	0.25	0.23	0.18	0.1
8	0.36	0.37	0.44	0.58	1.05	0.36	0.24	0.23	0.19	0.1
10	0.34	0.36	0.41	0.48	0.95	0.36	0.23	0.23	0.19	0.1
12	0.34	0.36	0.4	0.41	0.77	0.29	0.24	0.23	0.19	0.1
14	0.39	0.39	0.39	0.41	0.5	0.25	0.23	0.21	0.17	0.12
16	0.39	0.39	0.39	0.41	0.48	0.25	0.23	0.21	0.17	0.12

	Ca traitement-Ca témoin		- (Al échangé-Al témoin)		y=kymC/(1+kC)		y=kymC/(1+kC)		
	classement		x/y		modélisé		c/y=1/kym+1/ym*c		
	Ca=x	Al=y					a=1/ym=2.676	ym=.374	
C1	0.78	0	0.02	0.35	0	0	b=1/kym=.506	k=5.284	
	0.06	0	0.02	0.09	0	0	Résultats :		
	0.02	0	0.04	0.08	0	0	Second membre	0.506035	
	0.01	0	0.04	0.12	0	0	Err std de l'est. de Y	0.457033	
	0.02	0.01	0.12	0.13	0.083333	0.01877	R carré	0.856418	
	0.02	0.02	0.08	0.05	0.25	0.035747	Nombre d'observations	32	
	0	0.02	0.08	0.02	0.25	0.035747	Degrés de liberté	30	
	0	0.02	0.05	0.02	0.4	0.035747			
	C2	2.03	0.02	0.13	0.42	0.153846	0.035747	Coefficient(s) X	2.676558
		0.44	0.02	0.08	0.2	0.25	0.035747	Err std du coef.	0.200089
0.11		0.06	0.06	0.1	1	0.09003			
0.08		0.06	0.09	0.13	0.666667	0.09003			
0.07		0.07	0.1	0.13	0.7	0.100983			
0.06		0.07	0.13	0.06	0.538462	0.100983			
0		0.08	0.13	0.04	0.615385	0.111123			
0		0.09	0.13	0.04	0.692308	0.120537			
S1		0.29	0.11	0.1	0.16	1.1	0.137477		
		0.47	0.11	0.13	0.19	0.846154	0.137477		
	0.32	0.14	0.17	0.15	0.823529	0.159028			
	0.22	0.22	0.17	0.17	1.294118	0.20105			
	0.14	0.29	0.16	0.17	1.8125	0.226312			
	0.07	0.32	0.15	0.1	2.133333	0.235012			
	0.02	0.43	0.19	0.08	2.263158	0.259701			
	0.02	0.44	0.2	0.08	2.2	0.261517			
	S2	0.49	0.47	0.19	0.26	2.473684	0.266636		
		0.75	0.49	0.26	0.25	1.884615	0.269797		
0.74		0.61	0.26	0.23	2.346154	0.285442			
0.69		0.69	0.26	0.26	2.653846	0.2935			
0.61		0.74	0.23	0.26	3.217391	0.297831			
0.43		0.75	0.25	0.19	3	0.298642			
0.11		0.78	0.35	0.13	2.228571	0.300975			
0.09		2.03	0.42	0.13	4.833333	0.342106			

**Classification des espèces végétales en fonction de leur tolérance
à l'acidité des sols d'après B. CLERGET (1995)**

Tolerantes	Intermédiaires	Non-tolérantes
<p>Andropogon gayanus Bracharia decumbres Panicum maximum Loudetia simplex Aristida</p> <p>Zornia latifolia Stylosanthes capitata Lathyrus sylvensis</p> <p>Manioc, igname Pomme de terre Gingembre</p> <p>Plantain Canne à sucre Theier, caféier, cacaoyer Herbe à maté Palmier à huile, hévéa Fougères Acacia, Mimosa, eucalyptus, pinus</p>	<p>Pennisetum purpureum</p> <p>riz seigle, avoine, orge, blé Mil, maïs, sorgho</p> <p>Niébé, haricots noirs</p> <p>Patate douce Tomate</p>	<p>Centrosema plumieri Haricots blancs Soja, luzerne Arachide</p> <p>Cotonnier Thym espèces calcioles</p>

Physiologie et culture du maïs

Le grain de maïs, dans de bonnes conditions d'humidité et de température (optimum 25°C), se gorge d'eau et germe après 48 heures. Une petite racine, la radicule, pénètre dans le sol, suivie par d'autres racines secondaires dites "séminalles".

Presque en même temps que la radicule, une petite tige sort du grain et se développe vers la surface du sol. Cette tige forme un manchon (coléoptile) contenant les premières quatre à cinq feuilles qui se dérouleront à l'air libre. Enfin, une couronne de racines définitives apparaît à la base du coléoptile (figureA 9-1).

La tige s'allonge rapidement, les feuilles se développent, le bourgeon terminal forme l'inflorescence mâle. Les bourgeons de la tige ne forment pas de tiges secondaires (pas de tallage), ceux situés au milieu de la tige, donnent le pédoncule qui portera un épi femelle (1 ou 2 par plante).

Le stade de reproduction débute par la fécondation des structures femelles qui donneront les épis et les grains. Les épis portent de 8 à 20 rangs contenant chacun de 15 à 35 grains.

La floraison du maïs est la période la plus cruciale du développement de la plante; elle conditionne la formation puis le remplissage du grain (HALL 1978, HERRERO 1981 cité par GIRARDIN 1990).

Au cours des différents stades d'évolution, la plante manifeste des caractéristiques morphologiques différentes en fonction des conditions du milieu. Ainsi, les génotypes s'adaptent à la longueur des jours, à la température, aux conditions d'humidité, l'architecture de la plante subit des pressions qui aboutissent à une grande variabilité en ce qui concerne le nombre et la forme des feuilles, la hauteur de la plante (de 1 à 6 mètres), la disposition et le nombre d'épis, les types de grains. Cette variabilité présente un grand intérêt lorsqu'on veut améliorer la productivité ou adapter la plante dans un milieu particulier.

Les grains séchés représentent de 30 à 55% du poids sec de la plante entière.

Le grain de maïs est un caryopse de constitution unique puisqu'il contient à la fois le tégument séminal et la semence.

Les 4 principales structures physiques du grain sont : le péricarpe qui l'enveloppe, l'albumen riche en amidon, le germe ou embryon et la coiffe ou pédicelle, tissu où le grain est attaché à la rafle (figure A 9-2).

La composition chimique des différentes parties du grain (FAO 1993), présentée dans le tableau suivant met en évidence la valeur nutritive de l'albumen, 70 à 80% du poids du grain et du germe, 10 à 30% du poids sec du grain.

Composant chimique	Péricarpe	Albumen	Germe
Protéines	3.7	8.0	18.4
Extrait à l'éther	1.0	0.8	33.2
Fibres brutes	86.7	2.7	8.8
Cendres	0.8	0.3	10.5
Amidon	7.3	87.6	8.3
Sucre	0.34	0.62	10.8

Tableau A 9-1 : composition chimique des différentes parties du grain de maïs

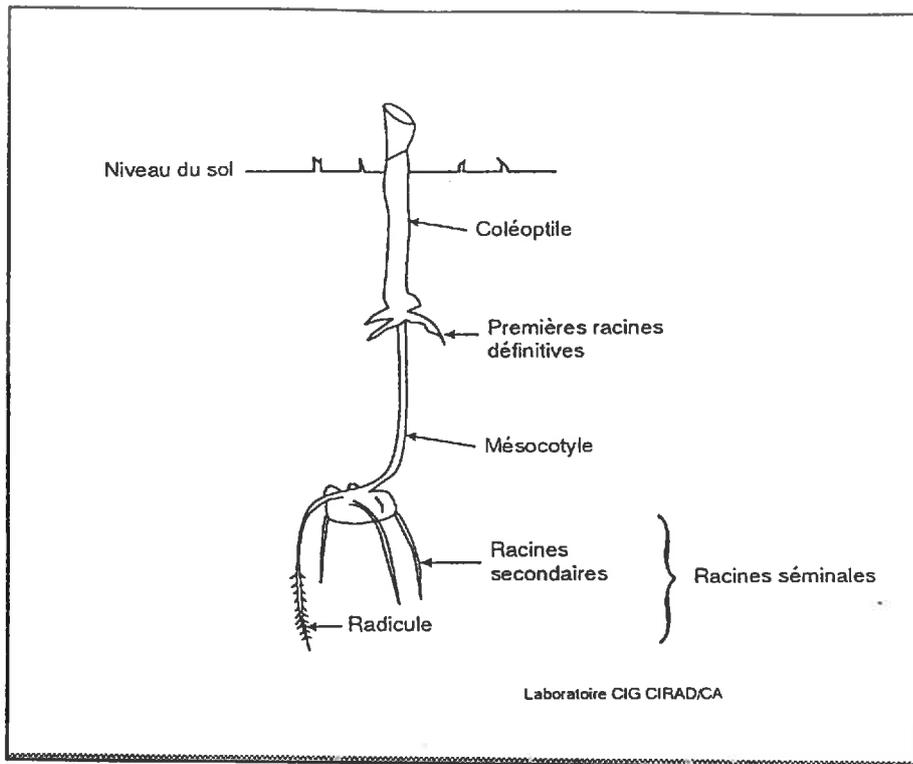


Figure A 9-1 : jeune plante de maïs au stade levée

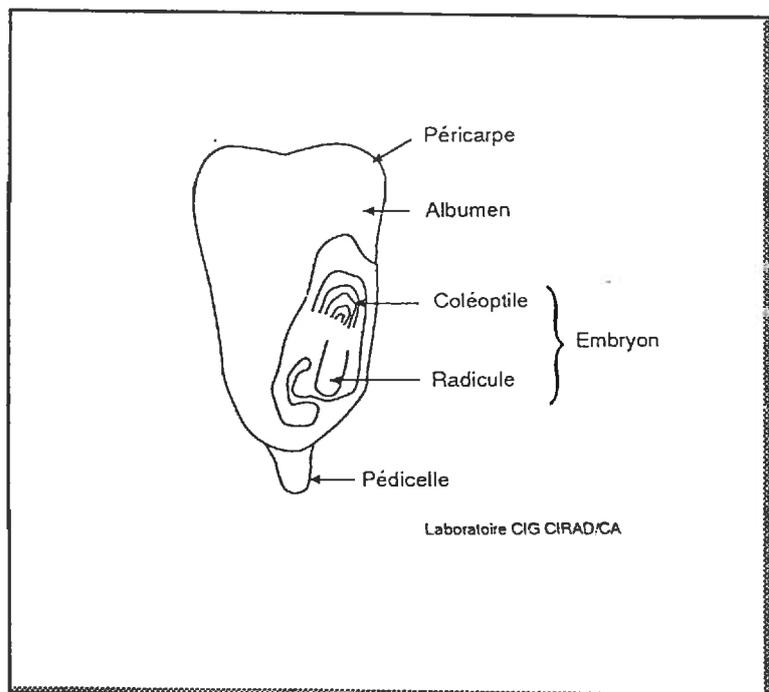


Figure A 9-2 : coupe d'une graine de maïs

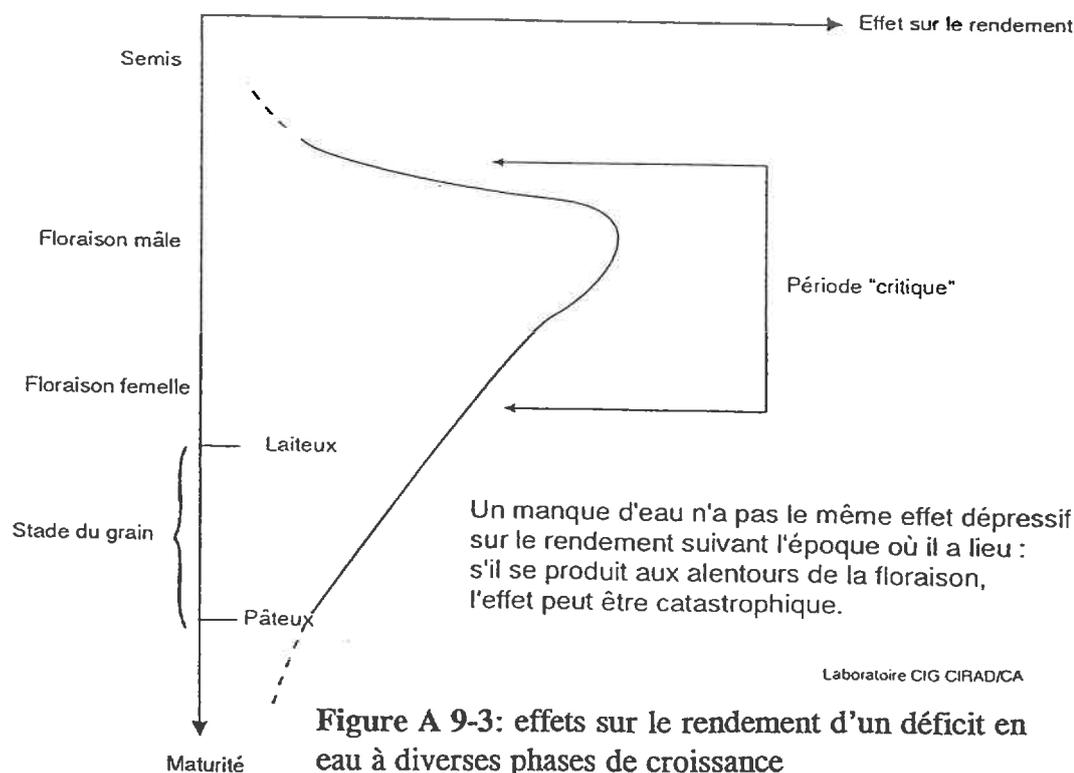
Culture du maïs

L'origine du maïs remonte à près de 7000 ans. Cultivé sur les hauts plateaux Mexicains, le maïs était un élément essentiel des civilisations Maya et Aztèque; il jouait un rôle important au niveau des croyances religieuses, des fêtes et de l'alimentation.

La culture du maïs s'est propagée vers le nord, jusqu'au Canada, et vers le sud jusqu'en Argentine. A la fin du 15^{ème} siècle, il a été introduit en Europe par l'Espagne et depuis n'a pas cessé de se développer.

En milieu tropical Africain, le maïs est en concurrence avec d'autres cultures vivrières traditionnelles (sorgho, tubercules). Sa production dans le monde est en moyenne de 480 millions de tonnes, dont 6% à peine proviennent de l'Afrique.

Le maïs de par son extrême variabilité, pouvait s'adapter autant dans les pays tempérés ou même froids que dans les pays tropicaux (ROUANET 1984, PANDEY 1992). Sa culture est possible au niveau de la mer, aussi bien qu'à 4000 mètres d'altitude. Généralement le plant de maïs a besoin d'un ensoleillement suffisant (synthèse de l'amidon). Sa nutrition minérale exige les éléments majeurs et les oligo éléments classique, avec une demande plus forte en azote en particulier avant la floraison afin de permettre la formation normale de l'épi. La teneur en matière organique du sol est un élément clé de la culture du maïs : la restitution des résidus de récoltes avant culture, qui maintient la vie microbienne, l'aération du sol, et la capacité de stockage des réserves hydriques est une excellente pratique culturale. Les besoins en eau dépendent de la durée du cycle des cultures; ainsi, 500mm d'eau bien répartis (après le semis, pendant la période encadrant la floraison) sont suffisants pour un maïs de 90 jours en zone Guinéenne, alors que les besoins peuvent dépasser 900mm en zone Soudanienne pour un maïs de 120 jours. Le déficit hydrique a des effets préjudiciables sur les rendements comme le montre la figure A 9-3 d'après cité par ROUANET (1984).



Systèmes de culture associés à la culture du maïs

La culture du maïs par les agriculteurs de petites exploitations destinées à la consommation humaine est souvent associée à d'autres cultures vivrières. Les exemples sont nombreux, et les cultures associées sont différentes suivant les critères climatologiques des régions (ROUANET 1984). A l'ouest du Cameroun en pays "Bamileké", sur une zone de 600 à 1600 mètres d'altitude, et une pluviométrie de 1500 à 2000 millimètres annuels, le maïs est associé à des pommes de terres, des patates douces ou des aracées (taros, macabo). Des légumineuses : arachides, vignas, complètent le cycle cultural. De tels systèmes sont protecteurs pour le sol, limitent l'érosion, entretiennent le taux de matière organique du sol par la restitution des déchets après récolte.

D'autres associations culturales sont développées, en particulier dans la zone Soudano-Guinéenne, (Nigéria, Bénin, Togo, Ghana). Après récolte d'ignames, les buttes sont transformées en nids d'abeille en forme de cuvettes. Tandis qu'à l'intérieur, sera semé du riz pluvial, les paysans cultivent du maïs, sur les diguettes entourant ces dépressions. En zone Soudano-Sahélienne le maïs est généralement présent lorsque la pluviométrie est supérieure à 800mm; il est alors associé au niébé.

Dans des zones où la culture du maïs est mécanisée, le paysan peut amener une récolte en rotation avec du sorgho (ou du mil) en altitude, ou en alternance avec du coton en plaine. Cette forme de culture s'apparente aux pratiques que l'on rencontre dans les pays développés et requiert une fumure appropriée.

Dans les régions sub-tropicales, les potentialités de rendements escomptées, en cultures pures, (en moyenne) pour des variétés ou des hybrides de maïs couramment utilisées sont pour la période de 1979 à 1987 compris entre 1.4 et 1.5 tonnes par hectare (FAO 1993), soit 3 à 5 fois moins que les rendements obtenus en climat tempéré sur des terres fertiles..

Valeur économique du maïs (dans les pays en voie de développement)

✓ Produit alimentaire

Alimentation humaine

La production des agriculteurs africains est autoconsommée en moyenne à 66%. Les quantités restantes alimentent les marchés locaux.

En prenant la Côte d'Ivoire comme exemple d'un pays en voie de développement où la culture du maïs est en pleine expansion, J.L. FUSELLIER note, dans le tableau présenté ci-dessous, que la consommation de maïs représente 9% de l'utilisation totale de produits vivriers dans ce pays.

Igname	103.8
Manioc	82.1
Riz blanchi	56.2
Banane plantain	48.9
Maïs (équivalent-grain)	30.5
Noix de palme	17.9

Tableau A 10-1 : consommation rapportée par personne pour les principaux produits vivriers en 1979 en Kg/an (J-L FUSILLIER, 1991)

La valeur économique du maïs en tant que produit de consommation alimentaire humaine est faible. Au Mexique, la fabrication artisanale et industrielle de tortillas semble être l'unique exemple de valorisation du produit à des fins alimentaires (FAO 1993).

La consommation humaine reste la principale utilisation du maïs dans la plupart des pays d'Afrique, bien que, d'une manière générale, elle soit inférieure à la consommation animale. Notons d'après le tableau A 10-2 que l'augmentation de la production du maïs à des fins alimentaires est deux fois moins rapide que celle destinée à la consommation de la plante par le bétail (+7.7% par an, entre 1961 et 1980).

	Quantité de maïs utilisé par habitant (Kg/an)	Part de %			% annuel									
		Alimentation humaine	Nourriture du bétail	Autres	Utilisation totale Taux de croissance			Alimentation humaine Taux de croissance			Nourriture du bétail Taux de croissance			
					61-70	70-80	80-86	61-70	70-80	80-86	61-70	70-80	80-86	
86-88	1983-87													
A	51	40	50	10	4.8	5.2	2.2	3.5	3.7	1.8	7.7	7.7	2.1	
B	240	6	78	16	2.8	3.1	1.2	2	2.7	1.6	3.1	2.7	0.3	
C	150	4	72	25	2.5	7.4	3	0.1	-0.1	-0.4	-1.6	8.6	3.1	
D	90	20	66	14	3.4	3.8	1.6	3.3	3.6	1.8	3.8	3.7	0.7	

A = Pays en développement B = Pays développés à économies de marché
C = Europe de l'Est et URSS D = Monde

source FAO

Tableau A 10-2 : Evolution des taux de croissance de consommation du maïs

Alimentation animale

Le maïs est une culture vivrière secondaire dans de nombreux pays d'Afrique. De ce fait, des surplus de production par rapport aux besoins alimentaires ont été dégagés. Les débouchés commerciaux sont apparus et les producteurs ont été intéressés par cette offre conditionnée par des perspectives de gains monétaires. Le maïs devient en Côte d'Ivoire une culture de rente d'autant plus que les fabricants d'aliments pour bétail renoncent à en importer, induisant une demande de 20 000 tonnes par an sur le marché local (JL FUSILLIER, 1991). L'évolution va dans le même sens en Tanzanie et au Zimbabwe. L'expansion de la production animale, principalement volaille et porc, ainsi que la fabrication d'aliments pour animaux, élaborés à partir de maïs, ont provoqué l'augmentation de la production de cette céréale. Le volume de la demande marchande ne cesse de croître; le développement rapide de l'élevage intensif a entraîné l'implantation d'unités de production au voisinage des grandes zones urbaines. La commercialisation est facilitée dans les régions où existe un réseau routier rendant possibles les transports et garantissant un prix de vente rémunérateur.

✓ Echange international

Les pays en voie de développement africains n'exportent pratiquement pas de maïs, exception faite de l'Afrique du Sud; par contre, l'importation de cette céréale est en augmentation sensible : de 12.2 % en 1970, elle est passée à 27 % en 1980, atteignait 37 % en 1986 et pourrait augmenter jusqu'à 63 % en l'an 2000 (C. BRENNER 1991). Les prix n'ont plus la stabilité des années 1960, mais se caractérisent par une forte fluctuation imputable aux aléas climatiques (sècheresses), aux amples variations des taux de change et aux brusques modifications intervenues dans les politiques agricoles des pays. L'augmentation de la production du maïs doit être réalisée pour répondre à la demande et enrayer l'accroissement des importations. Les solutions préconisées sont de trois types; aide au financement des importations, augmentation de la productivité par l'amélioration des semences, extension des surfaces cultivées.

Mode de sélection

Méthodes de sélection

Le maïs est une espèce présentant une grande variabilité. La croissance variable et les différences morphologiques des plants d'une même variété s'expliquent par l'hétérogénéité du milieu, et par le mode de reproduction particulier des plantes allogames (croisement naturel entre la fleur femelle de la plante et un grain de pollen apporté par le vent, issu d'une autre plante).

Les agriculteurs et les sélectionneurs, ont de tout temps exploité ces caractéristiques. Tandis que les premières méthodes de sélection (massale, épi à la ligne) ne contrôlent pas la pollinisation, celles incluant la maîtrise de ce paramètre sont plus efficaces et permettent de garantir des maïs de semence d'une même qualité.

L'autofécondation, (la fécondation étant effectuée en utilisant le pollen de la même plante), produit après 7 ou 8 générations une "lignée pure" qui est stable et homogène.

La sélection "récurrente" consiste après autofécondation à croiser avec un "testeur" (variété commune) les descendants et à combiner les meilleurs résultats entre eux afin de former une nouvelle population.

Les sélectionneurs forment ainsi divers types "d'hybrides"

- ✓ les hybrides simples constitués de 2 lignées pures
- ✓ les hybrides doubles constitués du croisement de deux hybrides simples.

D'autres formules permettent d'obtenir des hybrides synthétiques (ABCDE...) complexes (lignées x variétés), ou inter variétaux. La sélection produit des populations hybrides de maïs de semence (plasma germinatif) aptes à fournir des plants homogènes, avec une croissance et un rendement garantis. Elle a également été utilisée pour augmenter la résistance à la sécheresse, aux insectes et aux maladies. Ainsi, les sélectionneurs ont-ils obtenu des maïs morphologiquement adaptés aux exigences du milieu, avec d'excellents rendements comme le précise le tableau A 11 d'après SIMMONDS 1988. Les données provenant de recherches menées en Iowa font ressortir une augmentation de rendements de plus de 65 % sur une ancienne variété de maïs sur une période de 35 ans .

	29.7	44.5	59.3	Moyennes	hauteur
Ancienne variété PA (Reid)	5.15	5.48	4.66	5.10	202
Croisements doubles et hatifs, 1929-1939	5.78	5.58	4.84	5.40	211
Croisements doubles 1940-1951	6.40	6.67	6.03	6.36	209
Croisements doubles et récents, 1954-1960	6.69	7.31	6.91	6.97	213
Croisements doubles et contemporains, 1965	7.13	8.22	8.03	7.79	202

Tableau A 11 : rendement (t/ha) à trois densités de populations (milliers de plants par ha)

Les nouvelles techniques biologiques ont été évaluées par W.B. SUNDQUIST dès 1982 cité par C. BRENNER (1991) citons : la modification génétique au niveau cellulaire; la culture cellulaire et tissulaire; l'utilisation de régulateurs de la croissance végétale. R. PHILLIPS (1988) cité par C. BRENNER a montré qu'il existe actuellement des méthodes permettant de produire des végétaux transgénétiques (transfert direct d'A.D.N.). Par exemple, des cultures cellulaires ont permis d'isoler et de transférer un gène dominant issu de plusieurs lignées de maïs résistants à des herbicides. En 1992, la résistance à un herbicide, l'imidazolidone, a été inoculée à une centaine de lignées en vue de commercialisation par PIONER HI BRED international Inc, la plus grande entreprise semencière mondiale.

L'utilisation de marqueurs génétiques moléculaires P.T.F.R. (Polymorphisme de Taille de Fragments de Restriction), parvient à identifier les plages chromosomiques qui influencent les propriétés agronomiques de la plante, les QTL (Quantitative Trait Loci). Le CIMMYT a implanté des réseaux internationaux entre des entreprises et des organismes publics afin de rassembler des informations sur les locus essentiels correspondant à diverses propriétés agronomiques.

Tableaux des différentes variétés de maïs testées dans le cadre du programme STD3

Table 1 : 1994 Plant Materials

Varieties	Original	Characteristics
1. AF 1066 W	Brazil	Composite
2. AF 1066 Y	"	"
3. CMS B36 SAFRA	"	"
4. 9071 X B 36 SAFRA	Cameroon	Variety cross
5. 1368 x AF 1066	"	"
6. 9071 x AF 1066	"	"
7. 5012 x AF 1066	"	"
8. Hp 04	Madagascar	Composite
9. Tomboritsoa	"	"
10. 1368 x Hp 04	Cameroon	Variety cross
11. 1368 x Tomboritsoa	"	"
12. 9071 x Tomboritsoa	"	"
13. CMS 8806	"	Composite
14. ATP-SR-White	"	"
15. ATP-SR-Yellow	"	"
16. 8321-18 x Exp ₁ 24	"	Hybrid
17. Cimcalli 5A ₃	CIMMYT	Composite
18. FNi P GC ₁	"	"
19. FNi P 136	"	"
20. FWC P 236	"	"
21. Spectral	"	"
22. ADOUR 250	Spain	"
CHECKS		
23. HS 777 (suceptable)	Brazil	Hybrid
24. BR 201 F	"	"
25. CS 525	Cameroon	Composite
26. CMS 9213 (repeated check)		

Tableau des variétés testées au CAMEROUN.

Tableaux des différentes variétés de maïs testées dans le cadre du programme STD3

Populations observées en Guadeloupe - INRA94
Screened material for tolerance to acidity in Guadeloupe - INRA 94

<i>Numero</i>	<i>Genotype</i>	<i>Origine</i>
1	CC 91 SA3	CIMMYT - Colombie
2	CC 93 SA3	CIMMYT - Colombie
3	CC 93 SA4	CIMMYT - Colombie
4	CC 93 SA5	CIMMYT - Colombie
5	CC 93 SA6	CIMMYT - Colombie
6	CC 93 SA7	CIMMYT - Colombie
7	CC93 SA8	CIMMYT - Colombie
8	ATP yellow	IRA - Cameroun
9	C525 M	CARGILL - Bresil
10	BR 201 F	CNPMS - Bresil
11	HS 7777	CNPMS - Bresil
12	C525	CNPMS - Bresil
13	OC 40796	Bresil
14	HS 1230	CNPMS - Bresil
15	CMS 04	EMBRAPA - Bresil
16	CMS 04C	EMBRAPA - Bresil
17	CMS 07	EMBRAPA - Bresil
18	CMS 30	EMBRAPA - Bresil
19	CMS 36	EMBRAPA - Bresil
20	CMS 06	EMBRAPA - Bresil
21	Syntetico cateto	IAC - Bresil
22	Adour 250	Espagne
23	FWIPGCI	INRA - Guadeloupe
24	FWIPop 1/2	INRA - Guadeloupe
25	FWIPop T	INRA - Guadeloupe
26	Spectral	INRA - Guadeloupe
27	Diente de caballo	TARS - Puerto Rico
28	Mayorbela C3	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
29	FWIP126	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
30	FWIP124	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
31	FWIP224	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
32	FWIP125	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
33	FWIP127	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
34	FWIP327	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
35	FWIP128	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
36	FWIP228	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
37	FWIP136	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
38	FWIP236	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
39	Pioneer X304C	PIONEER
40	FWIP227	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
41	FWIP129	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
42	Tuxpeno brachytico	CIMMYT
43	Tuxpeno bra- D	CIMMYT
44	CC 91 SA3	CIMMYT - Colombie
45	CC 91 SA3	CIMMYT - Colombie
46	CC 91 SA3	CIMMYT - Colombie
47	FWIP136	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
48	FWIP136	INRA - Guadeloupe/CIMMYT
49	FWIP136	INRA - Guadeloupe/CIMMYT

Tableau des variétés testées à la GUADELOUPE.

Caractéristiques morphologiques et physiologiques exprimées dans le tableau de résultats

PA : aspect de la plante deux semaines après la floraison sur une échelle de 1 à 9.

Yield: rendement calculé à partir de la masse de graine brute, non sèche.

DST: date de floraison en jours.

PHT: hauteur des plants 5 à 6 feuilles.

PERFORMANCE OF SELECTED VARIETIES AT YAOUNDE IN 1994

VARIETIES	TREATMENTS												
	O				I				T				
	P.A	YIELD	DTS	PHT	P.A	YIELD	DTS	PHT	P.A	YIELD	DTS	PHT	
<u>CHECKS</u>													
HS 7777	3.7	2.5	76	208	2.0	4.4	70	248	1.5	5.6	66	263	
BR 201 F	3.2	1.1	72	155	2.0	5.4	65	210	2.0	5.7	64	228	
C 525	2.9	3.6	69	143	2.3	4.7	65	215	1.5	5.8	63	232	
CMS 9213	3.5	2.5	75	178	1.9	6.6	66	224	1.7	7.2	65	234	
8321-18 X EXP.24	3.6	1.9	72	157	2.0	9.2	64	218	1.7	9.4	62	243	
<u>TOLERANT VAR.</u>													
ATP WHITE	2.6	3.0	74	192	1.8	4.9	66	232	1.8	5.3	63	240	
ATP YELLOW	2.7	3.2	73	162	2.0	6.8	66	232	1.8	7.5	63	235	
AF 1066 W	3.9	1.4	76	192	2.0	5.0	67	235	1.8	5.5	66	252	
AF 1066 Y	3.0	2.4	75	180	2.0	5.1	67	238	1.7	5.0	66	237	
TOMBORITSOA	3.2	1.4	74	215	2.0	4.2	68	245	2.0	3.7	64	243	
5012 X AF 1066	3.2	1.8	75	196	2.2	4.2	66	198	1.7	5.1	63	252	
9071 X AF 1066	3.3	1.7	74	182	2.0	5.4	64	245	1.8	6.8	66	240	
CIMCALLI 5 A ₃	2.7	2.5	61	167	1.8	4.3	55	220	1.5	4.8	56	235	
Hp 04	3.5	1.4	74	218	2.5	3.3	67	237	2.0	3.2	64	245	
<u>SUSCEPTIBLE VAR.</u>													
9071 X B 36 SAFRA	4.2	1.7	76	188	2.5	3.7	66	242	1.7	4.5	65	255	
ADOUR 250	4.5	0.9	73	89	2.3	1.6	41	130	2.0	2.1	43	155	
CMS 8806	3.8	1.3	63	195	1.8	3.2	53	207	1.7	3.8	56	218	
1368 X TOMBORITSOA	3.9	0.8	75	155	2.5	3.9	65	243	1.8	4.6	60	233	
1368 X Hp 04	3.9	1.6	73	172	2.0	3.0	65	227	2.0	4.2	63	230	
SPECTRAL	3.8	1.4	73	145	2.2	4.0	60	215	2.0	5.2	60	223	
MEANS	3.6	2.0	72	176	2.1	5.2	63	224	1.8	5.3	62	233	

Caractéristiques morphologiques et physiologiques exprimées dans le tableau de résultats

PA : aspect de la plante deux semaines après la floraison sur une échelle de 1 à 9.

Yield: rendement calculé à partir de la masse de graine brute, non sèche.

DST: date de floraison en jours.

PHT: hauteur des plants 5 à 6 feuilles.

PERFORMANCE OF SELECTED VARIETIES AT EBOLOWA IN 1994

VARIETIES	TREATMENTS												
	O				I				T				
	P.A	YIELD	DTS	PHT	E.A	YIELD	DTS	PHT	P.A	YIELD	DTS	PHT	
<u>CHECKS</u>													
HS 7777	2.3	1.5	69	7	2.0	2.7	62	11	1.8	2.7	62	11	
BR 201 F	2.5	1.5	68	9	1.5	3.3	60	14	1.7	2.8	59	12	
C 525	2.0	2.2	67	9	1.8	3.2	59	20	1.8	4.2	60	16	
CMS 9213	2.3	1.6	67	6	1.8	3.1	61	11	1.4	3.3	61	10	
8321-18 X EXP ₂₄	2.0	1.6	65	7	1.3	3.7	59	13	1.3	4.2	58	12	
<u>TOLERANT VAR.</u>													
ATP WHITE	2.0	2.2	66	11	1.7	3.8	59	12	1.8	4.1	60	13	
ATP YELLOW	1.7	2.4	66	10	1.7	3.8	61	14	1.8	4.4	60	14	
AF 1066 W	2.3	1.9	69	8	2.0	2.7	63	10	2.0	2.8	62	8	
AF 1066 Y	2.4	1.9	69	9	1.8	2.2	61	9	2.0	2.4	60	8	
TOMBORITSOA	2.2	1.9	70	10	2.2	3.0	63	11	2.2	3.2	61	16	
5012 X AF 1066	2.2	1.5	65	8	1.7	3.6	59	18	2.0	3.9	62	14	
9071 X AF 1066	2.8	1.5	57	7	2.0	3.8	59	17	2.0	3.0	61	13	
CIMCALLI 5 A ₃	1.9	2.1	58	11	2.0	2.9	58	12	2.0	2.7	57	8	
Hp 04	2.0	1.9	66	8	2.5	3.1	62	12	2.2	3.2	62	14	
<u>SUSCEPTIBLE VAR.</u>													
9071 X B 36 SAFRA	2.2	1.6	66	6	1.8	3.9	60	13	2.2	4.0	60	8	
ADOUR 250	3.5	0.5	56	2	2.7	0.9	56	3	3.0	1.4	56	6	
GMS-8806	2.1	1.8	57	8	1.8	3.1	58	14	1.7	3.6	57	15	
1368 X TOMBORITSOA	2.2	1.2	64	7	2.2	2.5	60	9	2.4	2.8	59	9	
1368 X Hp 04	2.9	1.1	66	5	2.5	1.7	61	10	2.3	2.1	60	11	
SPECTRAL	2.8	1.4	68	3	2.2	1.7	59	7	2.0	2.3	57	8	
MEANS	.	1.6	66	7	2.0	3.0	60	12	2.1	2.9	60	11	
L.S.D. (0.05)	.	0.6	4	5	0.5	0.9	3	6	2.3	0.6	3	6	

Tableau des concentrations des acides organiques et des anions minéraux en pourcentage pondéral. Calcul des moyennes et des coefficients de variation pour chaque composé aux différentes normalités d'acide chlorhydrique

23.01.85
ESSAIS EXTRACTIONS A.O.
PAR DIFF CONCENTRATIONS HCL

N°	quinolate	"lactate" formate	nitrate	malate	"tartrate"	"malonate sulfate	oxalate	phosphat inconnu	citrate	isocitra	cis aco.trans.aco		
9	0.0000	0.0000	0.9747	0.4671	0.0379	0.0505	0.3486	0.0811	0.6775	0.1114	0.1408	0.1194	0.4523
HCL 0.1 N													
HCL 0.1 N	0.0000	0.0000	0.9693	0.4829	0.0379	0.0537	0.3588	0.0797	0.7574	0.0871	0.1365	0.1257	0.4492
HCL 0.1 N	0.0000	0.0000	1.0153	0.4513	0.0379	0.0537	0.3717	0.0811	0.7793	0.0871	0.1323	0.1131	0.4802
MOYENNE	0.0000	0.0000	0.9931	0.4671	0.0379	0.0526	0.3597	0.0806	0.7361	0.0952	0.1365	0.1194	0.4605
ECART	0.0000	0.0000	0.0168	0.0129	0.0000	0.0015	0.0095	0.0049	0.0091	0.0115	0.0035	0.0051	0.0139
C.V.			2.7584	2.8284	2.6330	0.7844	5.6975	17.8955	12.0726	2.5516	4.2974	3.0248	3.0248
HCL 0.05 N	0.0000	0.0000	0.9520	0.4703	0.0316	0.0568	0.3486	0.0863	0.7829	0.0418	0.1365	0.2010	0.4647
HCL 0.05 N	0.0000	0.0000	0.9942	0.5492	0.0316	0.0600	0.3473	0.0850	0.8021	0.0453	0.1408	0.1088	0.4802
HCL 0.05 N	0.0000	0.0000	0.9261	0.4929	0.0410	0.0600	0.3344	0.0811	0.7606	0.0418	0.1323	0.1005	0.4492
MOYENNE	0.0000	0.0000	0.9574	0.5039	0.0347	0.0588	0.3434	0.0841	0.7819	0.0428	0.1365	0.1361	0.4647
ECART	0.0000	0.0000	0.0281	0.0332	0.0045	0.0015	0.0084	0.0022	0.0170	0.0016	0.0035	0.0460	0.0126
C.V.			2.9318	6.5952	12.8565	2.9254	1.8601	2.8420	2.1713	3.8222	1.9111	2.5516	2.7217
HCL 0.01 N	0.1713	0.0671	0.9683	0.5555	0.0378	0.0789	0.3048	0.1046	0.9203	0.1045	0.2432	0.0754	0.4523
HCL 0.01 N	0.1599	0.0633	0.9115	0.4923	0.0252	0.0663	0.2920	0.0994	0.8532	0.1010	0.2261	0.0754	0.4306
HCL 0.01 N	0.2170	0.0658	0.9164	0.6091	0.0251	0.0757	0.2971	0.1046	0.8564	0.0940	0.2389	0.0754	0.4306
MOYENNE	0.1827	0.0654	0.9320	0.5523	0.0284	0.0736	0.2980	0.1028	0.8767	0.0936	0.2361	0.0754	0.4378
ECART	0.0247	0.0016	0.0257	0.0477	0.0068	0.0054	0.0053	0.0025	0.0309	0.0014	0.0043	0.0000	0.0102
C.V.	13.5015	2.4616	7.4481	8.6410	24.0027	7.2843	1.7739	3.5258	3.2789	4.3508	3.0717	0.0000	2.3348
HCL 0.005 N	0.2969	0.0968	0.9099	0.5623	0.0347	0.0757	0.2084	0.0928	0.8532	0.1010	0.3200	0.1257	0.4213
HCL 0.005 N	0.2684	0.1033	0.9374	0.5649	0.0316	0.0789	0.2225	0.0941	0.8788	0.1045	0.2944	0.1257	0.4368
HCL 0.005 N	0.4169	0.1136	0.8596	0.4671	0.0347	0.0789	0.2058	0.0950	0.9085	0.0404	0.2603	0.1351	0.3717
MOYENNE	0.3274	0.1046	0.9023	0.5281	0.0337	0.0778	0.2122	0.0906	0.8468	0.0987	0.2915	0.1288	0.4099
ECART	0.0643	0.0069	0.0322	0.0435	0.0015	0.0074	0.0074	0.0040	0.0291	0.0037	0.0059	0.0044	0.0277
C.V.	19.8474	6.6100	3.5719	8.2278	4.4194	1.9111	3.4639	4.4585	3.4310	8.3786	8.3925	3.4493	6.7683
HCL 0.001 N	0.7938	0.1794	0.9585	0.5993	0.0221	0.0663	0.1891	0.0379	0.9299	0.1079	0.3712	0.0754	0.5295
HCL 0.001 N	0.8052	0.1730	1.0039	0.8091	0.0158	0.0663	0.1929	0.0392	0.9619	0.1079	0.4309	0.0817	0.5390
HCL 0.001 N	0.5882	0.1691	0.9650	0.6080	0.0139	0.0663	0.1942	0.0392	0.9651	0.1010	0.4224	0.0251	0.5328
MOYENNE	0.7290	0.1739	0.9758	0.6028	0.0173	0.0663	0.1921	0.0388	0.9523	0.1056	0.4082	0.0607	0.5318
ECART	0.0997	0.0043	0.0201	0.0068	0.0035	0.0000	0.0022	0.0006	0.0159	0.0016	0.0039	0.0264	0.0959
C.V.	13.8771	2.4504	70.7107	2.0551	1.1310	20.3333	0.0000	1.1382	1.5890	1.6686	3.4493	6.4625	41.6657
													1.1970
N°	quinolate	"lactate" formate	nitrate	malate	"tartrate"	"malonate sulfate	oxalate	phosphat inconnu	citrate	isocitra	cis aco.trans.aco		
HCL 0.1 N	0.0000	0.0000	0.9931	0.4671	0.0379	0.0526	0.3597	0.0806	0.7361	0.0952	0.1365	0.1194	0.4605
HCL 0.05 N	0.0000	0.0000	0.9574	0.5039	0.0347	0.0589	0.3494	0.0841	0.7819	0.0429	0.1365	0.1361	0.4647
HCL 0.01 N	0.1827	0.0654	0.9320	0.5523	0.0284	0.0736	0.2980	0.1028	0.8767	0.0936	0.2361	0.0754	0.4378
HCL 0.005 N	0.3274	0.1046	0.9023	0.5281	0.0337	0.0778	0.2122	0.0906	0.8468	0.0987	0.2915	0.1288	0.4099
HCL 0.001 N	0.7290	0.1739	0.9758	0.6028	0.0173	0.0663	0.1921	0.0388	0.9523	0.1056	0.4082	0.0607	0.5318

Mode opératoire d'extraction des acides organiques dans des plantules de maïs cultivées en solution hydroponique et soumises a un stress aluminique

Après culture laver les plantules. Séparer les parties aériennes du grain et des racines par un scalpel. Lyophiliser les échantillons et broyer à 50 μ m.

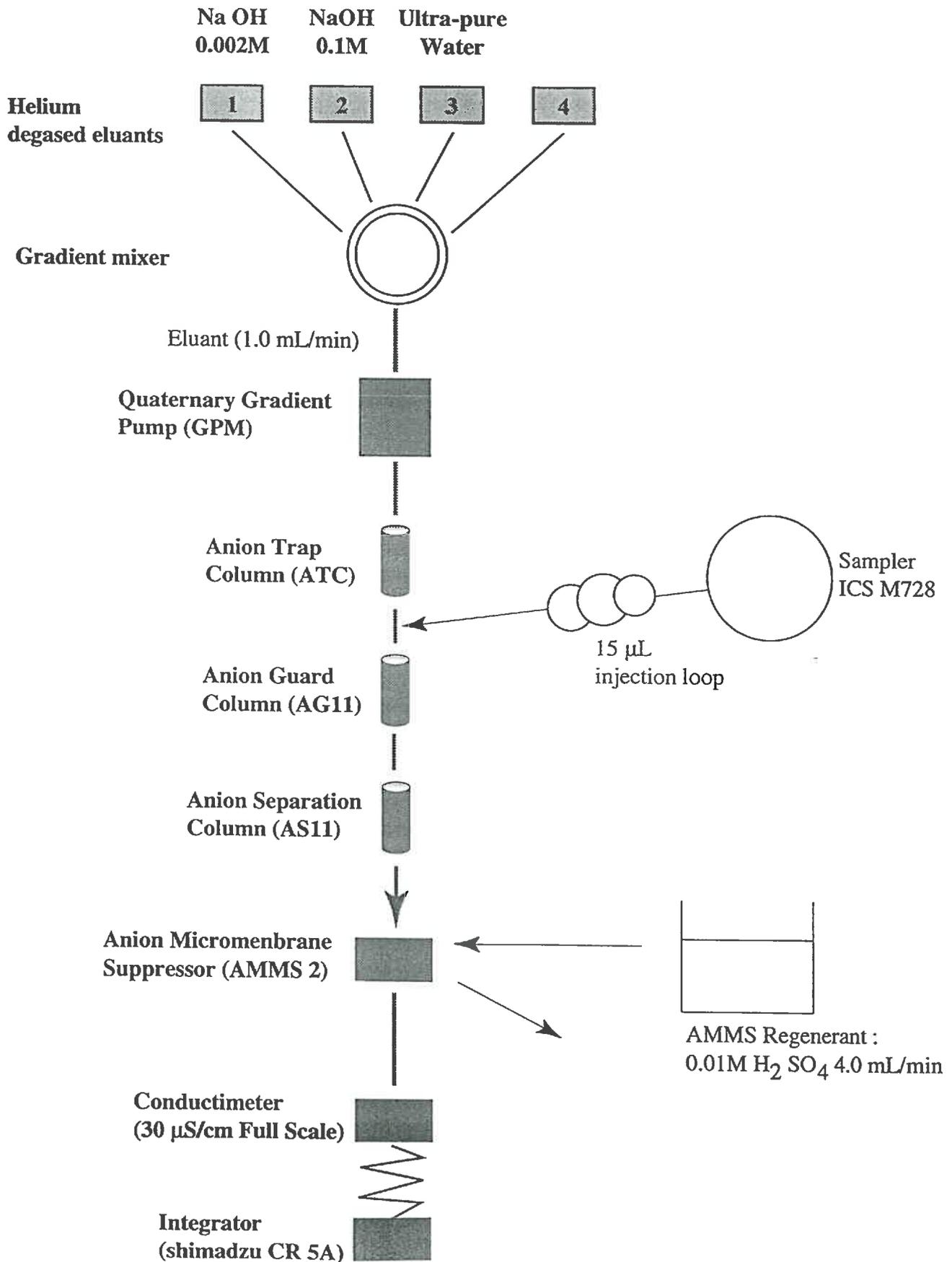
Peser, environ 200 milligrammes au 1/10 de milligramme, et introduire dans un erlem de 250 millilitres à col rodé. Ajouter 50 millilitres d'une solution d'acide chlorhydrique 0.005N à 20% d'alcool éthylique.

Porter la solution à ébullition, par un agitateur magnétique chauffant, sous reflux, pendant une heure. Filtrer l'extrait et ajuster dans une fiole jaugée à 50 millilitres par de l'alcool à 20%.

Séparer l'extrait de ses cations. Dans un godet, peser 1 gramme de résine échangeuse de cation sous forme H⁺ (AMBERLITE IR120). Ajouter 1 millilitre de solution et 9 millilitres d'eau et laisser sous agitation douce pendant 5 minutes.

Filtrer l'extrait obtenu à 0.45 μ m, avant son dosage par chromatographie ionique.

Schématisation des différents modules du système
de chromatographie ionique

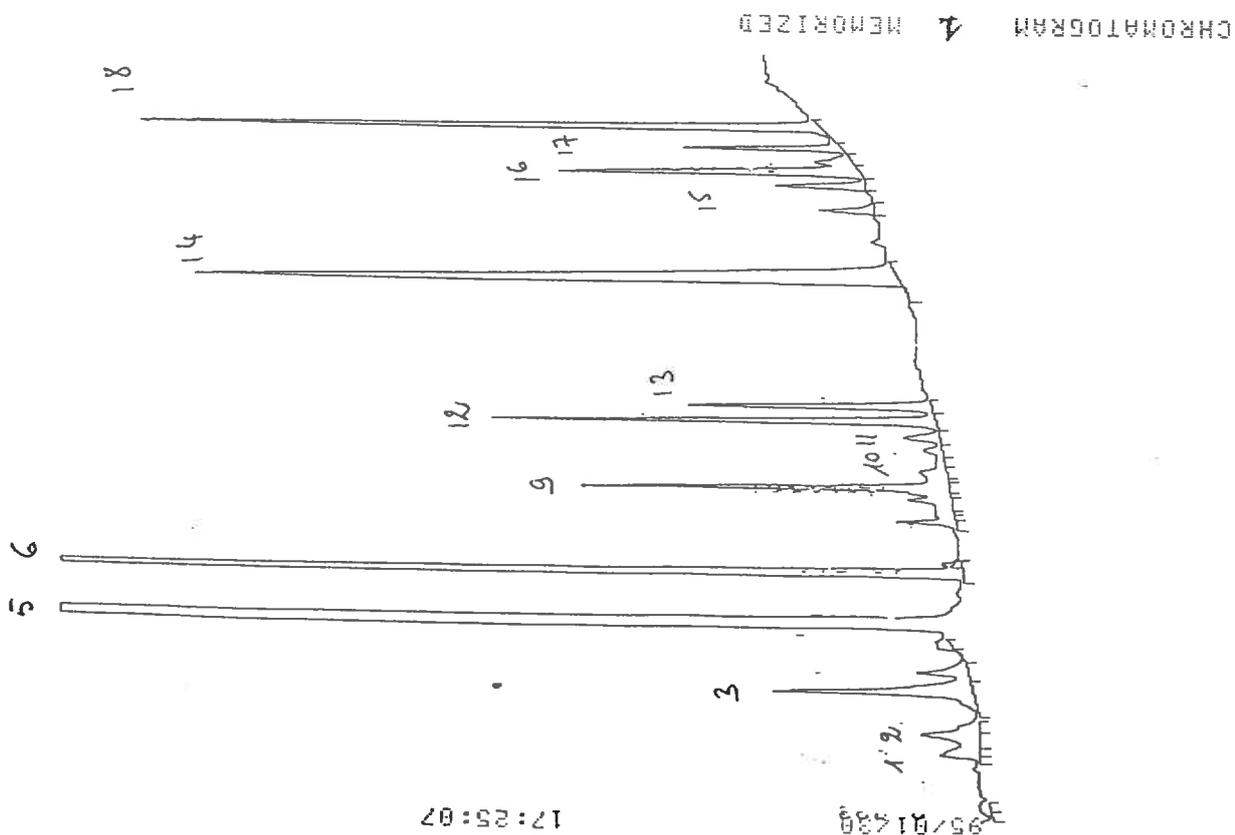
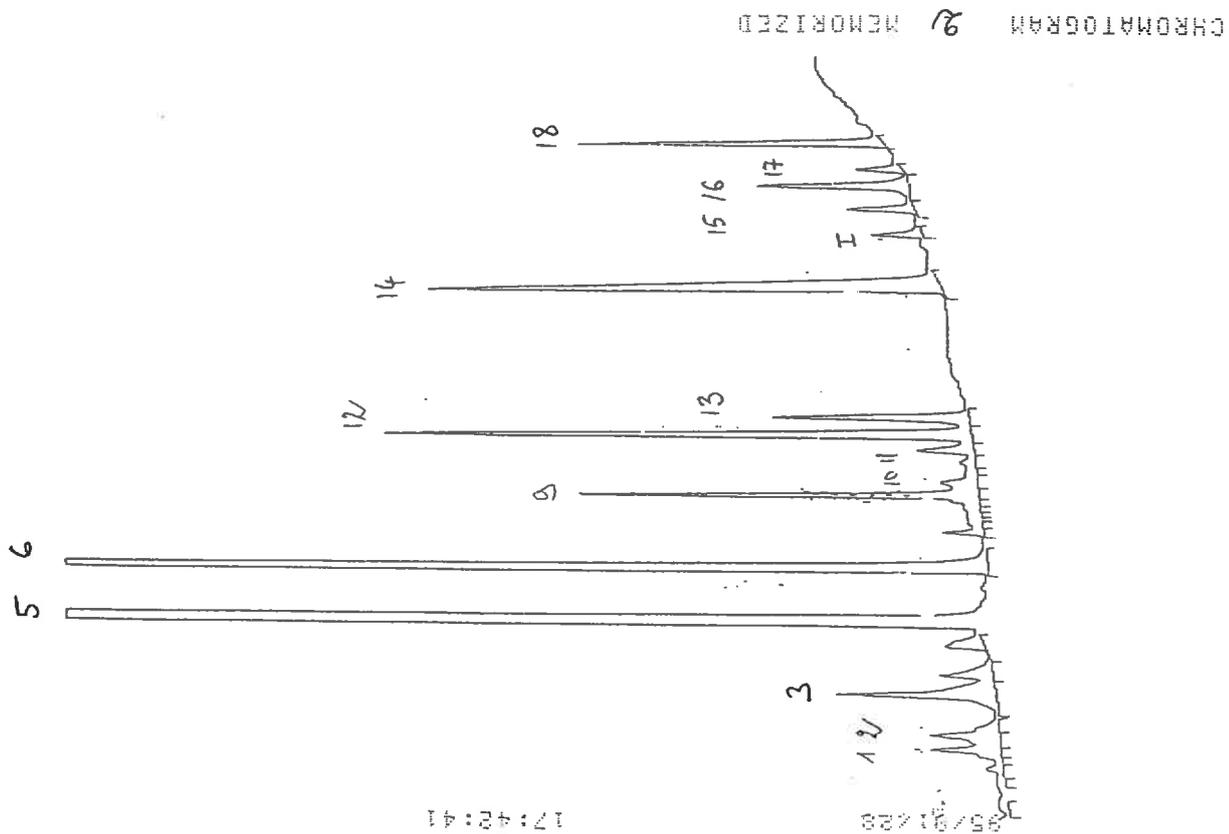


**Gradient d'élution programmé pour séparer les anions minéraux et organiques
contenus dans les extraits de plantules de maïs**

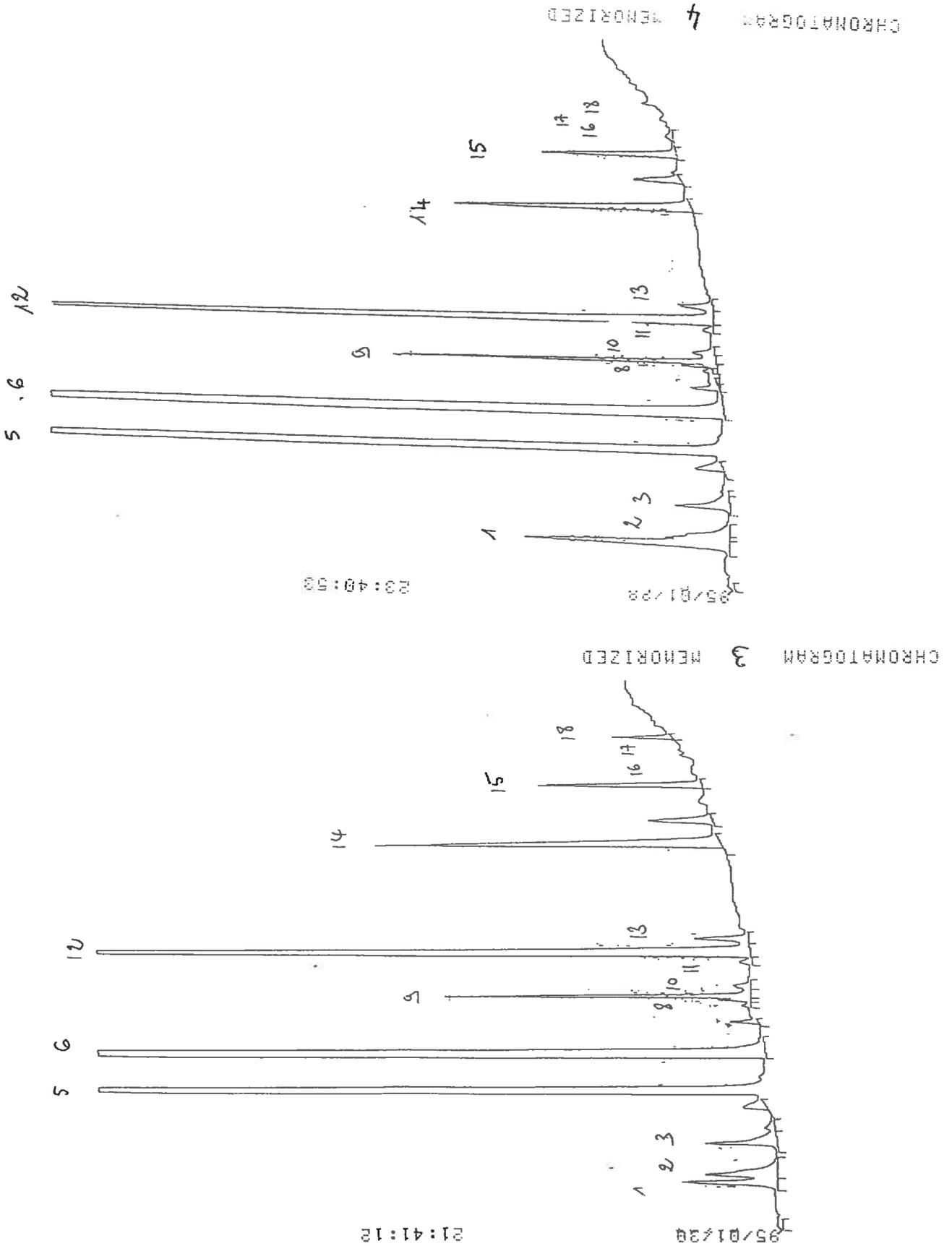
temps	% éluant 1 NaOH 0.002M	% éluant 2 NaOH 0.1M	% éluant 3 MetOH	% éluant 4 H2O
0	5	0	8	87
0.1	injection 15 μ L			
4	20	0	8	72
5	20	1	8	71
8	50	4	8	38
16	70	7	8	15
23	76	12	8	4
25	77	15	8	0
30	72	20	8	0
35	52	40	8	0
40	52	40	8	0

1 : 5 jours de culture - 10µM d'Al par litre - partie aérienne - variété sensible HS7777

2 : 5 jours de culture - 10µM d'Al par litre - partie aérienne - variété tolérante CS25M



3 : 5 jours de culture - 10µM d'Al par litre - racines - variété sensible HS7777
4 : 5 jours de culture - 10µM d'Al par litre - racines - variété tolérante C525M



CALCULS CONCENTRATIONS ACIDES ORGANIQUES **Résultats exprimés en grammes pour 100 grammes de matière sèche**

N°	(1) quinat	(2) lactate	4,69 acetate	(3) formate	6,75	7,97 chlorure	(6) nitrate	16,7	(8) succinate	(9) malat
HS10AI5j P.A	10	0,0874	0,2505	0,0000	0,6991	0,1573	5,0973	0,1456	0,0291	0,7224
C 10 AI5j P.A.	33	0,1981	0,1126	0,0000	0,1371	0,0832	1,8224	0,0000	0,0000	0,3657
HS10AI5j RAC	15	0,3787	0,4078	0,0000	0,3204	0,0350	12,7986	0,0583	0,0583	0,7340
C 10 AI5j RAC	40	0,9437	0,0610	0,0000	0,0595	0,0054	3,9610	0,0136	0,0136	0,3684

N°	(10) malo tartrate	18,8	(11) tartrate	20,15 sulfate	(13) oxalate	(14) phosphate inconnu	31,3	(15) citrate	(16) isocitrate	(17) cis aconitate	(18) trans
HS10AI5j P.A	10	0,0233	0,0932	0,9903	0,5185	2,9186	0,1165	0,1864	0,0990	0,2563	0,3923
C 10 AI5j P.A.	33	0,0409	0,0737	0,3299	0,1188	1,0406	0,0562	0,0837	0,2870	0,0951	0,3113
HS10AI5j RAC	15	0,0000	0,0384	4,2876	0,1981	1,5787	0,2447	0,5243	0,0000	0,0000	0,1223
C 10 AI5j RAC	40	0,0191	0,0164	0,6736	0,0303	0,5517	0,0991	0,2443	0,0000	0,0000	0

LISTE DES SIGLES

CEE	Communauté économique européenne.
CIMMYT	Centro internacional de mejoramiento de maíz y trigo Mexique.
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.
CORAF	Conférence des responsables de la recherche agronomique africains.
CNRS	Centre national de la recherche scientifique.
EMBRAPA	Empresa brasileira de pesquisa agropecuaria - Brasilia
FAO	Food and agriculture organization of the united nations - Italie.
GERDAT	Département (du CIRAD) de gestion, recherche, documentation et appui technique.
IITA	International institute of tropical agriculture - Nigéria.
INRA	Institut national de la recherche agronomique.
IRA	Institut de recherche agronomique - Cameroun.
IRRI	International rice research institute - Phillipines.
OCDE	Organisation de coopération pour le développement économique.
ORSTOM	Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération.
STD3	Science and technologie for developing countries
URA	Unité de recherche et d'analyse du département GERDAT - CIRAD.

RESUME

L'une des missions du CIRAD est de contribuer à l'augmentation des capacités agricoles des pays situés dans sa zone d'intervention. Dans ce contexte, notre laboratoire est associé à l'étude de l'adaptation de la culture du maïs dans des sols acides, peu fertiles.

La mise en cultures de nouvelles terres arables, en zone tropicale humide, se heurte à des contraintes physico-chimiques relatives à la nature des composés argileux d'altération (kaolinite). L'acidité qui en résulte et l'aluminium libéré ont des effets néfastes sur les plantes. L'aluminium est toxique à faible concentration dans la solution du sol, et il est, de plus, difficile à éliminer.

Deux solutions sont envisagées : la correction de l'acidité par des amendements ou l'adaptation de la plante au caractère acide et aluminique des sols. Les amendements minéraux sont peu satisfaisants d'un point de vue agronomique et surtout économique dans ces régions du monde. L'adaptabilité du maïs à ces types de sols semble être une solution séduisante d'autant que cette plante, par sa variabilité génétique se prête à l'amélioration variétale.

Les essais au champ permettent de cribler des variétés de maïs tolérantes ou sensibles à la toxicité aluminique mais ils sont longs.

Aussi, des tests de culture in vitro dans une solution nutritive de faible force ionique, équivalente à celle de la solution d'un sol acide tropical, sont-ils expérimentés. A partir de sept jours seulement de cultures, il est possible, par la mesure de la croissance racinaire, de discriminer significativement les variétés de maïs tolérantes ou sensibles à la toxicité aluminique. Les teneurs en acides organiques dans les racines des plantules, déterminées après leur extraction optimisée et leur analyse par chromatographie ionique, ne sont cependant pas suffisantes pour expliquer l'un des mécanismes supposé de détoxification de la plante.

MOTS CLES : Sols tropicaux, Acidité, Toxicité aluminique, Maïs, Simulation, Amendements, Cultures hydroponiques.

KEY WORDS : Tropical soils, Acidity, Aluminium toxicity, Maïze, Simulation, Liming, Hydroponics.