

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPEDOLOGIE

N° 9

1991

Mise en valeur des sols ferrallitiques
ferritiques des massifs du Sud
de la Grande Terre

Carences en phosphore et en silice :
résultats des deux premières études
expérimentales en serre

Frédérique GOURDON
Guillaume PUJOL
Catherine BOUCARON
Bernard BONZON
Laurent L'HUILLIER
Laurent COLLET

Avenant 2 à la Convention 4
Territoire / ORSTOM
notifié le 4 juillet 1989

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPEDOLOGIE

N° 9

1991

Mise en valeur des sols ferrallitiques
ferritiques des massifs du Sud
de la Grande Terre

Carences en phosphore et en silice :
résultats des deux premières études
expérimentales en serre

* Frédérique GOURDON
* Guillaume PUJOL
* Catherine BOUCARON
** Bernard BONZON
** Laurent L'HUILLIER
* Laurent COLLET

* CREA : Centre de Recherches et d'expérimentations
Agronomiques de Nésadiou
** ORSTOM : Agropédologie, Nouméa

Avenant 2 à la Convention 4 Territoire / ORSTOM notifié le 4 juillet 1989

ORSTOM

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

CENTRE DE NOUMÉA

© ORSTOM, Nouméa, 1991

Gourdon, F.
Pujol, G.
Boucaron, C.
/Bonzon, B.
/L'Huillier, L.
Collet, L.

**Mise en valeur des sols ferrallitiques ferritiques des massifs du Sud de la Grande Terre
Carences en phosphore et en silice : résultats des deux premières études expérimentales
en serre**

Nouméa : ORSTOM. Novembre 1991, 53 p.

Conv. : Sci. Vie : Agropédol. ; 9

Ø76AGROØ5

AGRONOMIE; CARENCE; FERTILISATION DU SOL; ENGRAIS MINERAL; ETUDE EXPERIMENTALE; CEREALE; SERRE/NOUVELLE CALEDONIE

Imprimé par le Centre ORSTOM
de Nouméa
Novembre 1991

 ORSTOM Nouméa
REPROGRAPHIE

AVERTISSEMENT

Ce rapport présente les résultats des deux premières études expérimentales en serre et sur vases de végétation conduites conjointement par le C.R.E.A. et l'ORSTOM dans le cadre de l'avenant 2 à la convention 4 entre le Territoire et l'ORSTOM pour l'étude des effets des fumures et des amendements calciques sur les sols cultivables de Nouvelle-Calédonie.

Les recherches entreprises concernent, plus précisément, les facteurs de la fertilité des sols ferrallitiques ferritiques des massifs du sud de la Grande Terre.

Ont contribué à leur réalisation :

- du côté de la Direction du Développement de l'Economie Rurale (DIDER),

. L.COLLET, Directeur du Centre de Recherche et d'Expérimentation Agronomiques (C.R.E.A.), Frédérique GOURDON, Chef du Laboratoire des Sols de Nessadiou, Catherine BOUCARON, G. PUJOL et les membres de leurs équipes, le C.R.E.A. étant, pour mémoire, maître d'oeuvre des présentes expérimentations en serre,

- du côté de l'ORSTOM,

. B.BONZON et L.L'HUILLIER du Laboratoire d'Agropédologie,

. J.PETARD, Chef du Laboratoire d'Analyse et les membres de son équipe.

Par ailleurs, la publication de ce rapport a fait appel aux services de Catherine CLEMEN et Evelyne BRUNETTO pour la dactylographie des textes et de J.P MERMOUD et N. GALAUD pour l'édition de l'ensemble.

RESUME

Le présent document rend compte des résultats de deux premières études expérimentales conduites sur vases de végétation, sous serre et avec le maïs comme plante-test, dans le but d'apprécier l'importance des carences en phosphore et en silice d'un sol ferrallitique ferritique type et les conséquences sur le développement de la plante de doses croissantes de phosphate supertriple et de silicate de magnésium sous forme de scories provenant de la métallurgie du nickel.

L'équivalent d'un apport de 4,5 t/ha de P_2O_5 est encore insuffisant pour lever la carence en phosphore du maïs. Par contre, lorsque la dose de phosphore augmente, on observe que les teneurs chez le maïs en fer, nickel et chrome diminuent, tandis que celles en phosphore, manganèse et cobalt s'élèvent. Par ailleurs, l'application de doses élevées (jusqu'à 40 t/ha) de scories ne semble pas avoir d'effet marquant sur la plante, du moins sur une aussi brève période d'expérimentation que celle réalisée (un mois), les teneurs en silice dans les parties aériennes demeurant toujours très faibles.

S O M M A I R E

DOCUMENTS ANTERIEURS	5
1 - INTRODUCTION	7
2 - PLAN GENERAL DE RECHERCHE	8
2.1 - CHOIX DU SITE EXPERIMENTAL	8
2.2 - PREMIERES ETUDES EN LABORATOIRE ET EN SERRE	8
3 - PREMIERE ETUDE EN VASES DE VEGETATION : EFFET DE DIFFE- RENTES DOSES D'AMENDMENT PHOSPHATE ET SILICEUX	9
3.1 - PROTOCOLE EXPERIMENTAL	9
3.2 - MESURES ET OBSERVATIONS : RESULTATS	10
3.2.1 - Températures dans la serre durant la conduite de l'essai	10
3.2.2 - Comportement de la plante en cours de végétation : développement atteint à la récolte	10
3.2.3 - Teneur et immobilisations des parties aériennes à la récolte	14
3.2.4 - Mesures sur le sol après la récolte	14
3.2.5 - Mesures sur les percolats à la récolte	18
3.2.6 - Bilan phosphaté	18
3.3 - DISCUSSION	20
4 - TEST D'ORIENTATION	20
4.1 - PROTOCOLE EXPERIMENTAL	20

4.2 - MESURES ET OBSERVATIONS : RESULTATS	22
4.2.1 - Comportement de la plante : développement à la récolte	22
4.2.2 - Teneurs en éléments minéraux des parties aériennes à la récolte	22
4.2.3 - Analyses de sol après la récolte	27
4.3 - CONCLUSION	27
5 - DEUXIEME ETUDE EN VASES DE VEGETATION : EFFETS D'UN AMENDEMENT SIMULTANE DE PHOSPHORE ET DE SILICE	29
5.1 - PROTOCOLE EXPERIMENTAL	29
5.2 - MESURES ET OBSERVATIONS : RESULTATS	29
5.2.1 - Températures dans la serre durant la conduite de l'essai	29
5.2.2 - Comportement de la plante en cours de végétation : développement atteint à la récolte	31
5.2.3 - Teneurs et immobilisations des parties aériennes à la récolte	34
5.2.4 - Mesures sur le sol après la récolte	37
5.2.5 - Mesures sur les percolats à la récolte	39
5.3 - DISCUSSION	39
6 - DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION	40

ANNEXES

ANNEXE 1: Protocole expérimental de la première étude en vases de végétation	45
ANNEXE 2: Protocole expérimental de la deuxième étude en vases de végétation	50

DOCUMENTS ANTERIEURS

PUJOL G., 1989. Etude sur vase de végétation, sur un maïs, d'amendements phosphaté et calcique sur un sol ferrallitique ferritique du sud néo-calédonien. Mémoire de fin d'étude de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs et de Techniciens pour l'Agriculture. C.R.E.A. ed, multig, 101 p.

BOURDON E., 1990. Variations morphologiques et physico-chimiques des sols d'une parcelle d'expérimentation de la vallée de la Coulée (Sud de la Nouvelle-Calédonie). Conventions. Sciences de la vie. Agropédologie n° 5. ORSTOM ed, multig, 36 p.



1 - INTRODUCTION

Lors de l'inventaire des sols potentiellement cultivables de Nouvelle-Calédonie, dressé en 1979 pour hiérarchiser les recherches à entreprendre en ce qui concerne les facteurs de leur fertilité et de leur évolution sous culture, les sols ferrallitiques ferritiques du sud de la Grande Terre furent placés en cinquième position, après les sols alluviaux et vertiques équilibrés, les sols sodiques acides et les vertisols hyper-magnésiens. L'état d'avancement des travaux en 1987 permettant d'envisager d'engager des recherches sur ce nouveau type de sols à partir de 1988-89, l'étude des conditions de leur mise en valeur fut donc entreprise conjointement par le C.R.E.A. et l'ORSTOM dans le cadre de la nouvelle convention liant ces deux organismes pour l'étude des effets des fumures et des amendements sur les sols cultivables de Nouvelle-Calédonie.

Appartenant au groupe des sols oxydiques, les sols ferrallitiques ferritiques représentent les faciès ultimes de l'évolution des sols issus de roches ultrabasiques. Ils sont constitués presque uniquement de sesquioxides de fer (hématite et goethite), ont une texture argilo-limoneuse, une structure extrêmement fragile mais une réserve en eau utile assez importante (de l'ordre de 8%) et une forte vitesse de filtration, un pH-eau de l'ordre de 5,5 en surface, une très faible capacité d'échange en cations (de 1 à 5 méq en surface) variable avec le pH et capable de s'inverser pour un pH donné (le point de charge nulle) lorsque leur teneur en matière organique passe en dessous d'un certain seuil. Ce type de sols appartient ainsi, pour cette dernière raison, au groupe des sols à charges variables que l'on peut aisément caractériser par le fait que leur pH-eau est inférieur à leur pH-KCI.

Leur formation exige des conditions tropicales humides. Ils se situent alors sur pentes (fortes à faibles), c'est à dire dans des conditions de pédogénèse favorables à l'élimination du profil, par lixiviation oblique, de la silice, de l'aluminium et des bases vers les fonds des vallons ou des vallées où ces produits vont s'accumuler partiellement pour engendrer des sols peu évolués d'apport alluvial partiellement oxydiques et magnésiens.

Au plan agronomique, ils se caractérisent par de très faibles réserves en nutriments et une rétention du phosphore considérable, mais aussi par la possibilité d'être aisément travaillés par les outils aratoires ce qui représente un avantage considérable, pour les cultures maraîchères notamment, dans des régions à la pluviosité élevée.

Ces sols couvrant environ 10 000 hectares aux portes de Nouméa, l'étude des conditions de leur mise en valeur méritait donc d'être entreprise.

2 - PLAN GENERAL DE RECHERCHE

L'expérience acquise antérieurement, avec l'étude des conditions de mise en valeur des vertisols hyper-magnésiens en particulier, permettait d'adopter dès le départ le schéma général défini pour ces recherches, schéma que l'on peut résumer ainsi :

- première étape : recherche d'un site expérimental représentatif du type de sols à étudier ;

- deuxième étape : études expérimentales en serre et en laboratoire destinées à préciser l'état d'un certain nombre des facteurs chimiques de la fertilité ;

- troisième étape : mise en place d'une expérimentation au champ de 5 ans destinée à vérifier le bien fondé des conclusions des études en laboratoire et en serre, à mettre en évidence et corriger de nouveaux problèmes et à aborder la question de l'évolution du sol sous culture ;

- quatrième étape : étude de la variabilité des facteurs de la fertilité du type de sols en question à l'aide d'une expérimentation multilocale et pluriannuelle plus légère que la précédente ;

- cinquième étape : mise en place et suivi d'un réseau de points d'observation de l'évolution à long terme du type de sols en question.

2.1 - CHOIX DU SITE EXPERIMENTAL

Le choix du site expérimental fut effectué, fin 88, avec l'appui de Didier BLAVET, pédologue de l'ORSTOM. L'étude pédologique fine du site lui-même fut réalisée ensuite par Emmanuel BOURDON, pédologue de l'ORSTOM également (cf le rapport correspondant dont les références sont rappelées ci-dessus).

2.2 - PREMIERES ETUDES EN LABORATOIRE ET EN SERRE

Les premières recherches expérimentales en laboratoire et en serre, furent lancées l'année suivante et conduites entièrement au C.R.E.A. Ce dernier, en effet, avait pu être doté en 1988 d'une serre et des moyens nécessaires de prétraitement du sol et de culture sur vases de végétation.

Ces premiers travaux sont présentés dans ce document. Ils consistent essentiellement en :

1°/ - une première étude sur vases de végétation, à caractère prospectif, sur la masse initiale de phosphore à incorporer au sol pour lever une très vraisemblable carence en cet élément, ceci en fonction du pH auquel l'on pourrait porter préalablement le sol par une application de carbonate de calcium sous forme de croûte calcaire broyée (cf le protocole expérimental à l'annexe 1) ;

2°/ - en des tests d'orientation divers, toujours sur vases de végétation ;

3°/ - en une seconde étude expérimentale sur vases de végétation ayant comme objectif de mettre en évidence une éventuelle carence en silice et son interaction avec la carence en phosphore, la silice étant apportée sous forme de scories silico-magnésiennes, sous-produit de la production de mates de nickel par l'usine de la Société le Nickel à Nouméa (cf le protocole expérimental à l'annexe 2).

3 - PREMIERE ETUDE EN VASES DE VEGETATION : EFFET DE DIFFERENTES DOSES D'AMENDEMENT PHOSPHATE ET CALCIQUE

3.1 - PROTOCOLE EXPERIMENTAL

L'objectif de cette première expérimentation en serre était donc, d'une part, d'établir la courbe de réponse de la plante test - le maïs - à une dose croissante d'amendement phosphaté et, d'autre part, d'apprécier l'influence de deux doses d'amendement calcique.

Le phosphore a été apporté sous forme de superphosphate triple à 44,5 % de P_2O_5 . Ont été étudiées les six doses suivantes :

Dose 1 : 0 kg/ha de P_2O_5
Dose 2 : 250 kg/ha de P_2O_5
Dose 3 : 500 kg/ha de P_2O_5
Dose 4 : 1 000 kg/ha de P_2O_5
Dose 5 : 2 000 kg/ha de P_2O_5
Dose 6 : 3 000 kg/ha de P_2O_5 .

L'amendement calcique a été apporté sous forme de croûte calcaire (origine Creek-Aymes) titrant 42 % de CaO. Les deux doses étudiées ont été calculées, à l'issue d'un test en laboratoire, de façon à obtenir des pH respectifs de 5,6 et 6,2 avec en :

Dose 1 : 0,7 T/ha de CaO
Dose 2 : 2,1 T/ha de CaO.

Le dispositif retenu est un essai en blocs complets à parcelles subdivisées comportant 6 répétitions et 144 pots¹. L'étude a duré 28 jours, du semis à la récolte.

Le protocole détaillé est porté en annexe 1.

¹ NB : dans la numérotation des traitements, le premier chiffre correspond à la dose de P_2O_5 et le second à celle de CaO.

3.2 - MESURES ET OBSERVATIONS : RESULTATS

3.2.1 - Températures dans la serre durant la conduite de l'essai

L'expérimentation s'est déroulée en saison fraîche du 24 Mai au 10 Juillet 1989. Le semis a été effectué le 12 Juin.

Les températures relevées dans la serre durant cette période sont portées en figure 1.

3.2.2 - Comportement de la plante en cours de végétation : développement atteint à la récolte

3.2.2.1 - Observations générales

Le développement végétatif est resté faible, même sur les meilleurs plants. En effet, les pieds ne dépassaient pas 31 cm à la récolte, la vitesse de croissance en hauteur est restée inférieure à 1,5 cm/jour et la matière sèche maximale était de 6g/plant (cf. tableau 1), alors qu'en conditions favorables la taille des plants atteint 40 à 60 cm au 28ème jour, la vitesse de croissance 4 cm/jour et le poids sec 25 à 30 g/pied.

Ceci est dû, du moins en partie, au fait que l'expérimentation s'est tenue en saison fraîche ce qui ne favorise pas la croissance du maïs.

Par ailleurs, des carences en phosphore ont été observées à compter du 11ème jour suivant le semis, y compris, mais plus discrètement, sur les traitements de 2 et 3 T P_2O_5 /ha.

Comme l'illustre la figure 2, on arrive rapidement pour les traitements à 0, 250 et 500 kg/ha de P_2O_5 à un épuisement des plantes avec des croissances journalières presque nulles, alors que pour les traitements à 2000 et 3000 kg P_2O_5 /ha la croissance des plants continue (cette croissance restant liée aux conditions thermiques). Le traitement à 1000 kg/ha est intermédiaire avec une faible reprise de croissance en fin d'expérimentation.

3.2.2.2 - Analyse de variance

Le tableau 2 ci-joint récapitule les analyses de variance effectuées sur les hauteurs des plants au cours de l'étude, sur les vitesses de croissance, sur le nombre de feuilles dégainées et sur le poids de matière sèche des parties aériennes à la récolte.

On observe un effet hautement significatif des doses de phosphate sur l'ensemble de ces paramètres à compter du 14ème jour.

La figure 3 ci-jointe montre que l'accroissement de la matière sèche à la récolte est proportionnelle à la quantité d'amendement phosphaté appliquée. En ce qui concerne la hauteur totale à la récolte, la droite s'infléchit légèrement pour les fortes doses.

Tableau 1 : HAUTEUR TOTALE DES PLANTS ET POIDS SEC DES TIGES ET FEUILLES A LA RECOLTE SELON LE TRAITEMENT PHOSPHATE

Dose Phosphore	Hauteur Totale (cm)	Matière Sèche (g)
1	54,5	0,88
2	60,4	1,16
3	65,6	1,55
4	74,4	2,24
5	92,5	4,11
6	103,1	5,97

Figure 1 : TEMPERATURES DANS LA SERRE : MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES

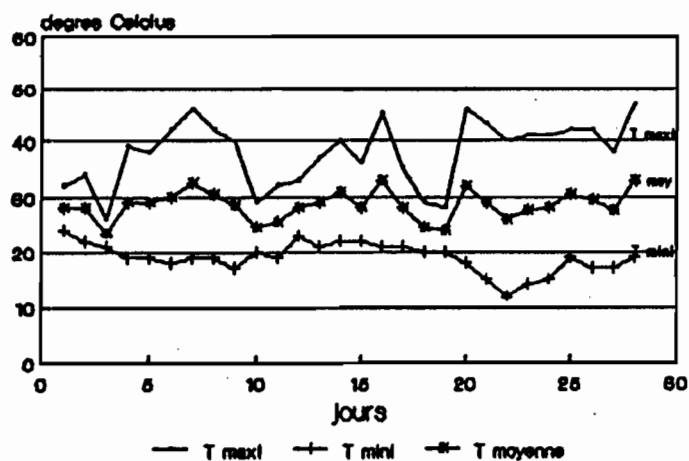


Figure 2 : VITESSE DE CROISSANCE DES PLANTES DURANT L'EXPERIMENTATION

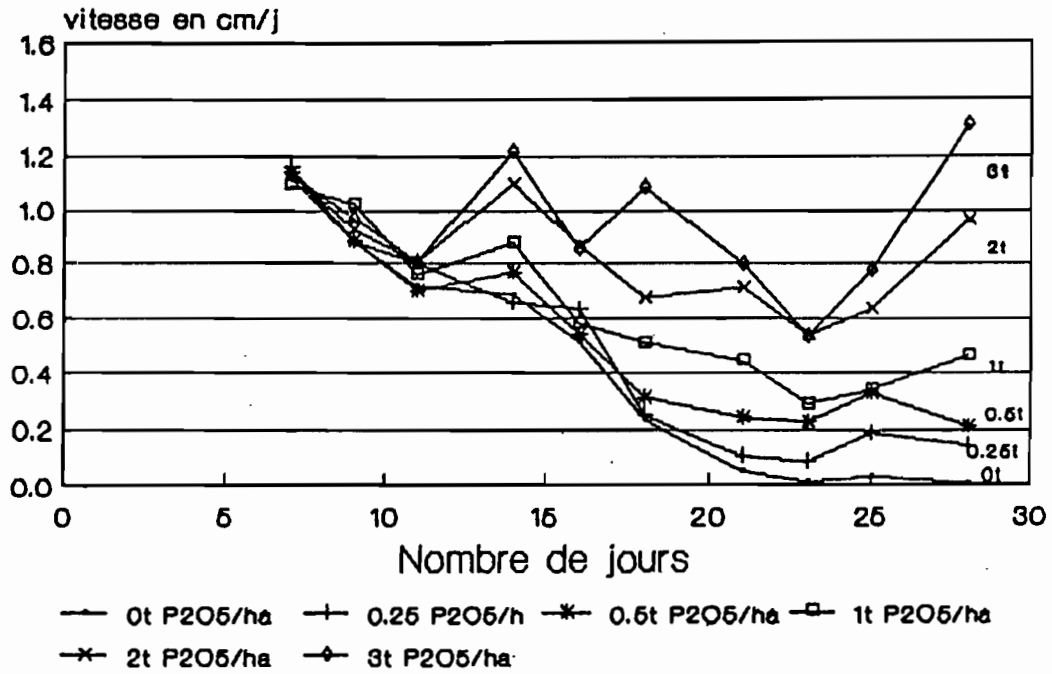
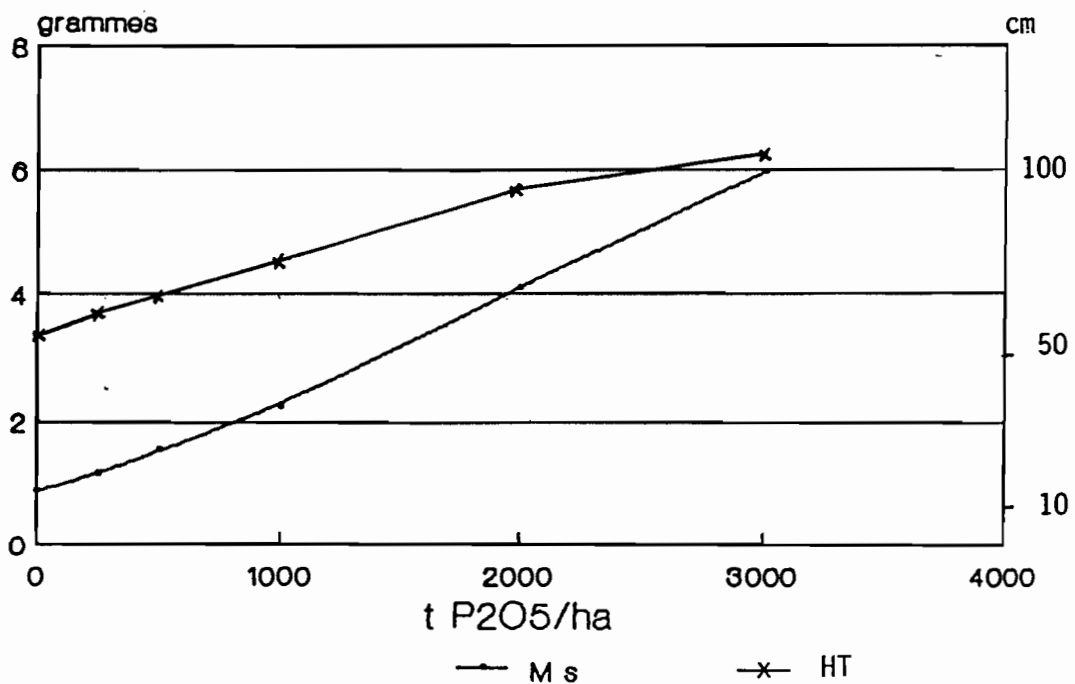


Figure 3 : HAUTEUR TOTALE DES PLANTS ET POIDS SECS DES TIGES ET FEUILLES A LA RECOLTE



TABEAU 2 : RECAPITULATIF ANALYSES DE VARIANCE de l'étude en serre N°1/ferralitique

PARAMETRES (*)	Moy. Gén.	PROB. EFFET SIGNIFICATIF				Coeff. varia. %	EFFETS SIGNIFICATIFS SUR			
		P	Bloc	Ca	P X Ca		PHOSPHORE	BLOC par ordre décroissant	Ca	
									1	2
H 7	7,947	-	*	-	-	V.Rn.h	-	5-4-3-6-2-1	-	
H 9	9,801	-	*	-	-	9,49	-	5-4-2-3-6-1	-	
H 11	11,331	-	*	*	*	7,17	-	5-4-3-6-2-1	11,13<11,53	
H 14	13,980	**	-	-	-	7,82	6=5>4=2=3=1	-	-	
H 16	15,310	***	-	*	-	7,18	6=5>4=2=3=1	-	14,98<15,63	
H 18	16,320	***	-	**	-	7,01	6>5>4=2=3=1	-	15,95<16,69	
H 21	17,494	***	-	-	-	6,51	6>5>4>3=2=1	-	-	
H 23	18,056	***	-	-	-	6,98	6>5>4>3=2=1	-	-	
H 25	18,823	***	-	*	-	7,22	6>5>4>3=2>1	-	17,78<18,33	
H 28	20,373	***	-	-	-	8,15	6>5>4>3=2>1	-	-	
Hauteur Totale	75,081	***	-	-	-	5,81	6>5>4>3>2>1	-	-	
V 97	0,927	-	-	-	-	49,59	-	-	-	
V 119	0,765	-	-	*	-	34,73	-	-	0,696<0,835	
V 1411	0,883	***	-	-	-	23,03	6=5>4=3=1=2	-	-	
V 1614	0,665	**	-	-	-	40,49	5=6>2=4=3=1	-	-	
V 1816	0,505	***	-	-	-	48,70	6>5=4>3=2=1	-	-	
V 2118	0,391	***	*	-	-	40,76	6=5>4>3>2=1	1-2-6-4-3-5	-	
V 2321	0,281	***	-	-	-	58,12	5=6>4=3>2=1	-	-	
V 2523	0,383	***	-	-	-	52,27	6=5>4=3=2=1	-	-	
V 2825	0,517	***	-	-	-	33,62	6>5>4>3=2=1	-	-	
Nb Feuill.	4,417	***	-	-	-	6,65	6>5>4>3>2>1	-	-	
Matière Sèche	2,651	***	-	-	-	V.Rn.h	6>5>4>3=2=1	-	-	
pH Percol.	6,921	-	-	*	-	4,06	-	-	6,86<6,99	
pH-eau Sol	5,911	-	-	***	-	V.Rn.h	-	-	5,71<6,11	
pH-KCl Sol	5,981	*	-	***	-	1,35	3=1=2>4=6=5	-	5,87<6,09	

(*) : hauteurs (H) et vitesse (V) exprimées en cm et cm/jour, les chiffres correspondant aux jours d'observation

Par contre, il y a très peu d'effets significatifs de la dose d'amendement calcique et les différences observées entre les deux doses sont faibles avec des hauteurs supérieures pour 2,1 T/ha de CaO aux 11ème, 16ème, 18ème et 25ème jours.

Par ailleurs, une seule interaction phosphore - calcium significative (sur la hauteur au 11ème jour) est observée.

Enfin, il existe quelques effets blocs sur les variables H7, H9 et H11.

3.2.3 - Teneurs et immobilisations des parties aériennes à la récolte

Les teneurs et les immobilisations des parties aériennes ont été mesurées sur les échantillons moyens de chaque traitement et sont portées sur les tableaux 3 et 4.

Les teneurs mesurées sont dans l'ensemble satisfaisantes pour les cendres, l'azote, le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium. Elles sont élevées pour le fer et le manganèse et faibles pour la silice et le phosphore. Le nickel, le chrome et le cobalt étaient présents à l'état de traces.

On constate par ailleurs que l'augmentation de la quantité d'amendement phosphaté se traduit apparemment par des teneurs en silice et en phosphore plus élevées et par une diminution des teneurs en cendres, en azote, en potassium et en sodium.

L'accroissement de la dose de croûte calcaire semble entraîner de son côté une augmentation des teneurs des pieds en calcium et en fer accompagnée d'une baisse des teneurs en silice et en magnésium.

En ce qui concerne les immobilisations, on observerait, d'une manière générale, des immobilisations en éléments majeurs (N, P, K, Mg) plus faibles avec la dose 2 de calcium. Ceci pourrait provenir d'un relèvement du pH trop important et trop rapide pour le pH 6,2 qui entraînerait un blocage du transport des éléments majeurs vers la plante. Au contraire, les immobilisations en fer, aluminium et chrome paraissent augmentées par l'application de cette dose de calcium.

3.2.4 - Mesures sur le sol après la récolte

Les principales déterminations ont été faites sur les échantillons moyens de chaque traitement et sont portées sur le tableau 5.

L'amendement calcique se traduit, comme prévu, par un pH-eau d'environ 5,6 pour la dose 1 et de 6,2 pour la dose 2, quelque soit la dose de phosphore amenée. Le pH-KCl, qui est pour le témoin de 5,8 pour un pH-eau de 5,3, augmente également avec la dose de CaO. On observe alors sur ce sol, lorsqu'il est amendé

Tableau 3 : ANALYSES VEGETALES -ETUDE EN SERRE N°1/FERRALLITIQUE - TENEURS (%) -

TRAITEMENT	Cendres	SiO ₂	N	P	Ca	Mg	K	Na	Cu	Fe	Al	Mn	Ni	Cr	Co
11	14,45	0,89	4,397	0,083	0,689	0,354	5,806	0,011	0,027	0,295	0,028	0,091	0,008	0,004	0,004
12	13,91	0,92	4,491	0,085	0,897	0,283	5,366	0,006	0,024	0,420	0,035	0,081	0,008	0,007	0,004
21	13,40	0,96	3,972	0,098	0,747	0,321	5,076	0,006	0,020	0,425	0,120	0,083	0,024	0,007	0,004
22	13,83	1,01	4,108	0,095	0,829	0,266	5,286	0,007	0,024	0,283	0,025	0,094	0,007	0,004	0,004
31	13,70	1,03	4,029	0,102	0,792	0,331	5,106	0,006	0,037	0,233	0,020	0,086	0,007	0,003	0,003
32	13,39	0,94	3,857	0,103	0,879	0,269	4,921	0,006	0,023	0,480	0,038	0,081	0,010	0,008	0,004
41	12,77	1,03	3,337	0,115	0,747	0,299	4,696	0,004	0,029	0,375	0,030	0,080	0,009	0,006	0,003
42	13,25	0,93	3,574	0,109	0,887	0,274	4,646	0,006	0,032	0,928	0,083	0,091	0,015	0,016	0,004
51	12,01	1,17	3,299	0,130	0,754	0,271	4,411	0,004	0,011	0,163	0,010	0,068	0,006	< 0,002	0,003
52	11,91	0,83	3,276	0,124	0,854	0,274	4,286	0,004	0,013	0,183	0,010	0,077	0,004	< 0,002	0,003
61	11,65	1,26	3,326	0,157	0,774	0,338	4,026	0,005	0,012	0,170	0,010	0,075	0,005	< 0,002	0,003
62	10,93	0,99	3,042	0,142	0,803	0,308	3,773	0,004	0,011	0,233	0,018	0,069	0,005	0,003	0,004
Témoin 0	14,04	0,82	-	0,029	0,169	0,123	1,733	0,002	0,014	0,730	0,070	0,038	0,012	0,013	0,002
Sol alluvion *	12,20	2,25	3,19	0,24	0,35	0,39	3,13	0,002	-	0,095	-	0,037	-	-	-

* réf test d'orientation (voir § 4.1)

Tableau 4 : ANALYSES VEGETALES -ETUDE EN SERRE N°1/FERRALLITIQUE

- IMMOBILISATIONS (mg/pot) -

TRAITEMENT	Cendres	SiO ₂	N	P	Ca	Mg	K	Na	Cu	Fe	Al	Mn	Ni	Cr	Co
11	121,5	7,5	37,0	0,70	5,79	2,98	48,8	0,09	0,23	2,48	0,24	0,77	0,07	0,03	0,03
12	126,9	8,4	41,0	0,78	8,18	2,58	48,9	0,05	0,22	3,83	0,32	0,74	0,07	0,06	0,04
21	159,6	11,4	47,3	1,17	8,90	3,82	60,5	0,07	0,24	5,06	1,43	0,99	0,29	0,08	0,05
22	156,0	11,4	46,3	1,07	9,35	3,00	59,6	0,08	0,27	3,19	0,28	1,06	0,08	0,05	0,05
31	212,8	16,0	62,6	1,58	12,30	5,14	79,3	0,09	0,57	3,62	0,31	1,34	0,11	0,05	0,05
32	208,3	14,6	60,0	1,60	13,68	4,19	76,6	0,09	0,36	7,47	0,59	1,26	0,16	0,12	0,06
41	306,2	24,7	80,0	2,76	17,91	7,17	112,6	0,10	0,70	8,99	0,72	1,92	0,22	0,14	0,07
42	276,5	19,4	74,6	2,27	18,51	5,72	97,0	0,13	0,67	19,37	1,73	1,90	0,31	0,33	0,08
51	493,1	48,0	135,5	5,34	30,96	11,13	181,1	0,16	0,45	6,69	0,41	2,79	0,25	0,08	0,12
52	489,3	34,1	134,6	5,09	35,08	11,26	176,1	0,16	0,53	7,52	0,41	3,16	0,16	0,08	0,12
61	701,8	75,9	200,4	9,46	46,63	20,36	242,5	0,30	0,72	10,24	0,60	4,52	0,30	0,12	0,18
62	646,0	58,5	179,8	8,39	47,46	18,20	223,0	0,24	0,65	13,77	1,06	4,08	0,30	0,18	0,24
Témoin 0	97,44	5,69	-	0,20	1,17	0,85	12,03	0,01	0,10	5,07	0,49	0,26	0,08	0,09	0,01

Tableau 5 : RESULTATS DES ANALYSES DE SOL -ESSAI SERRE N°1/FERRALLITIQUE

TRAITEMENT	M.O. %	C/N en 10 ⁻³	BASES ECHANGEABLES @ meq/100 g de terre					CEC @	P ₂ O ₅ OLSEN (%)	pH eau	pH KCL	N	BASES TOTALES (%)				
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Somme						CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Somme
11	2,0	19,4	1,17	0,23	0,07	0,07	1,54	1,9	0,002	5,6	6,0	0,60	1,56	8,49	0,19	0,01	10,25
12	2,0	19,0	2,04	0,18	0,07	0,07	2,36	1,6	0,001	6,2	6,3	0,61	2,88	8,60	0,20	0,01	11,70
21	2,1	18,5	1,31	0,26	0,08	0,08	1,73	3,1	0,008	5,7	6,0	0,66	2,01	8,85	0,12	0,01	10,99
22	2,1	19,4	2,31	0,21	0,08	0,11	2,72	2,1	0,014	6,1	6,2	0,62	3,56	8,60	0,09	0,01	12,27
31	2,0	18,8	1,32	0,29	0,07	0,12	1,80	2,2	0,018	5,7	5,9	0,63	2,06	8,80	0,05	0,01	10,91
32	2,0	20,3	2,11	0,18	0,07	0,07	2,44	2,0	0,016	6,2	6,2	0,57	3,55	8,65	0,13	0,01	12,35
41	2,0	20,2	1,63	0,28	0,08	0,11	2,09	2,1	0,031	5,7	5,9	0,57	2,27	8,06	0,19	0,01	10,53
42	2,0	20,0	2,33	0,20	0,08	0,08	2,70	2,4	0,029	6,0	6,1	0,58	3,95	8,47	0,08	0,01	12,51
51	2,1	18,6	1,96	0,32	0,07	0,14	2,49	2,8	0,069	5,7	5,8	0,65	3,08	8,88	0,05	0,01	12,02
52	2,0	18,0	2,77	0,21	0,04	0,09	3,11	2,6	0,071	6,1	6,1	0,65	4,71	9,03	0,06	0,08	13,88
61	2,0	21,6	2,18	0,26	0,03	0,11	2,58	3,1	0,094	5,7	5,8	0,60	3,60	8,67	0,01	0,03	12,32
62	2,0	18,4	2,98	0,23	0,02	0,09	3,32	3,1	0,086	6,0	6,0	0,65	4,12	8,23	0,12	0,01	12,48
Ech. départ 0-20	2,0	21,7	0,50	0,43	0,01	0,14	1,08	1,8	0,001	5,1	5,8	0,52	0,73	9,51	0,08	0,01	10,32
Témoin 0 *	2,0	21,7	0,50	0,43	0,01	0,14	1,08	1,8	0,001	5,3	5,8	0,66	0,98	8,49	0,06	0,02	9,54

Ech. départ (0-20) : Arg : 45,3 % ; LF : 27,5 % ; LG : 10,6 % ; SF : 7,0 % ; SG : 9,4 % ; pF 4,2 : 19,4 ; pF 3,0 : 25,2 ; pF 2,5 : 28,6

* ce traitement hors essai a porté sur 2 pots : il a reçu la fumure complète mais aucun amendement

@ extraction par NH₄Cl (méthode de TUCKER)

avec 2,1 T CaO/ha, un point de charge nul, avec des pH-eau et KCl égaux. Par ailleurs, l'analyse de variance (cf. tableau 2) confirme l'effet très hautement significatif de l'amendement calcique sur le pH-eau et KCl. Elle montre aussi qu'il existe un effet significatif du phosphore sur le pH-KCl, avec des valeurs plus élevées pour les faibles doses d'engrais phosphaté.

La capacité d'échange cationique augmente légèrement avec les doses d'amendement phosphaté.

La teneur du sol en calcium échangeable et total s'accroît logiquement avec la dose d'amendement calcique et avec l'apport phosphaté (qui comprend du calcium).

Par contre, la teneur en magnésium échangeable diminue lorsqu'on amène de la croûte calcaire et qu'on en augmente la dose.

La somme des bases échangeables augmente, comme le calcium, d'une part avec l'apport et l'accroissement de la dose d'amendement calcique et d'autre part avec les doses croissantes de phosphore.

Enfin, la teneur en phosphore assimilable s'élève avec la dose d'engrais phosphaté et devient satisfaisante pour les traitements 5 et 6.

3.2.5 - Mesures sur les percolats à la récolte

L'analyse de variance (cf. tableau 2) laisse apparaître une légère augmentation de 0,1 unité du pH des percolats pour la dose 2 de croûte calcaire.

Les autres analyses faites sur percolats ne sont pas exploitables mais néanmoins on peut observer que l'on ne retrouve pas de phosphore dans les percolats. Il est donc possible de faire un bilan phosphaté.

3.2.6 - Bilan phosphaté

Le tableau 6 ci-joint permet d'établir un bilan approché du phosphore.

On constate que le phosphore immobilisé par les plantes et le phosphore assimilable présent dans le sol à l'issue de l'expérimentation augmentent dans de très fortes proportions avec l'amendement phosphaté.

Par ailleurs, le pourcentage de fixation du phosphore amené apparaît très élevé, de l'ordre de 90 %, et reste constant quelque soit la dose apportée.

Tableau 6 : FIXATION DU PHOSPHORE DANS LE SOL -BILAN-

TRAITEMENTS	P apporté (mg/pot)	P immobilisé * (mg/plant)	P assimilable x (mg/pot)	P fixé @	
				(mg/pot)	%
11	0	0,70	5,94	-	-
12	0	0,78	2,97	-	-
21	247	1,17	23,77	221,5	89,7
22	247	1,07	41,60	203,8	82,5
31	495	1,58	53,49	439,1	88,7
32	495	1,60	47,55	445,1	89,9
41	991	2,76	92,12	894,7	90,3
42	991	2,27	86,18	901,4	91,0
51	1981	5,34	205,04	1768,0	89,2
52	1981	5,09	210,98	1762,4	89,0
61	2972	9,46	279,33	2678,5	90,1
62	2972	8,39	255,56	2703,9	91,0

* dans les parties aériennes

x mesuré par la méthode OLSEN

@ mode de calcul : $P_{\text{fixé}} = P_{\text{apporté}} - (1,5 P_{\text{immobilisé}} + P_{\text{assimilable}})$

↓
(pour tenir compte des racines)

3.3 - DISCUSSION

L'effet de l'amendement phosphaté est très significatif et l'intérêt d'un important apport phosphaté ressort très nettement de cette première étude. En effet, seuls les amendements supérieurs à 2 tonnes de P_2O_5 /ha permettent de prolonger la croissance des plantes au delà des premiers jours. Néanmoins, on observe encore aux doses les plus élevées des symptômes de carence en phosphore et un développement végétatif médiocre.

Les teneurs en éléments minéraux sont dans l'ensemble satisfaisantes mais sont faibles pour la silice et le phosphore. Cependant, ces deux teneurs augmentent avec la dose d'amendement phosphaté.

Cet amendement entraîne également pour le sol une légère amélioration de la capacité d'échange cationique et une forte augmentation du phosphore assimilable qui atteint un niveau satisfaisant pour les traitements à 2 et 3 tonnes de P_2O_5 /ha.

Un apport de 3 T de P_2O_5 /ha a donc des effets très positifs sur la plante et sur le sol mais apparaît encore insuffisant.

Quant à l'amendement calcique, on observe très peu d'effets significatifs de la dose sur le développement de la plante. La dose de calcium la plus importante entraîne au contraire une baisse des immobilisations en éléments majeurs due peut-être à un relèvement trop rapide du pH qui entraînerait un blocage de leur transport.

En ce qui concerne le sol, l'augmentation de l'apport de croûte calcaire se traduit par une diminution du magnésium échangeable. Les pH-eau sont satisfaisants et on constate que l'on obtient le point de charge nulle avec un apport de 2,1 T CaO /ha.

4 - TEST D'ORIENTATION

4.1 - PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Ce test a été conçu pour orienter l'étude en serre suivante. Partant du constat de la carence en silice du sol, il s'agissait d'apprécier :

- d'une part, l'efficacité d'un apport de silice à des doses correspondant à une simple fertilisation permettant de couvrir les besoins de la plante, avec :

quatre doses ¹ :

- . Dose 1 : 125 kg/ha de SiO₂ (0,5 %)
- . Dose 2 : 250 kg/ha de SiO₂ (1 %)
- . Dose 3 : 375 kg/ha de SiO₂ (1,5 %)
- . Dose 4 : 500 kg/ha de SiO₂ (2 %)

et trois sources de silice :

- . ciment (1) : silicate de calcium (silicium : 11,7 %, calcium : 42 %)
- . scories (2) : scories de nickel (SiO₂ : 55 %, MgO : 36 %)
- . silice pure (3) : produit pour laboratoire finement broyé.

- d'autre part, l'intérêt d'un amendement siliceux apporté sous forme de scories de traitement du nickel. Les scories peuvent en effet être amenées en quantités importantes sans augmenter le pH du sol et présentent l'avantage économique d'être abondantes et gratuites à Nouméa. Quatre doses ont été comparées : 5 ; 10 ; 50 et 100 T/ha de scories (soit 2,75 ; 5,5 ; 27,5 et 55 T/ha de SiO₂), indicées S5, S10, S50 et S100.

En outre, nous avons procédé à un test prospectif sur la réponse de ce sol à de forts amendements phosphatés avec 4 doses de P₂O₅ :

3 ; 5 ; 7 ; 10 T/ha (indicées 62 ; 72 ; 82 ; 92).

Il n'y a aucune répétition, chaque traitement étant appliqué sur seulement 2 vases de végétation. Un amendement de 3 T P₂O₅/ha a été apporté en sus sur tous les pots recevant une fertilisation ou un amendement siliceux.

Tous les vases ont été amendés avec 2,1 T/ha de CaO (sous forme de croûte calcaire), sauf ceux ayant reçu du ciment, lequel contient déjà 44 % de calcium.

Tous les pots ont reçu une solution nutritive complète. En outre, quatre plants ont été semés sur terre d'alluvion de Bourail afin d'apporter des références pour les teneurs du maïs en différents éléments.

¹ : pour la numérotation des traitements le premier chiffre correspond à la dose et le second à la source de SiO₂

4.2 - MESURES ET OBSERVATIONS : RESULTATS

4.2.1 - Comportement de la plante : développement à la récolte

Les tableaux 7, 8, 9 et 10 et les figures 4, 5 et 6 ci-joints rendent compte du comportement des maïs en fonction des différents traitements .

Il semblent indiquer que :

- un apport de silice inférieur à 500 kg/ha n'a pas d'influence sur la hauteur et le poids sec des plants à la récolte. En effet, on ne note pas de différences entre les pieds qui ont reçu les différentes doses de ciment, de scories ou de silice pure et les plants témoins (traitement 62 à 3 T/ha de P_2O_5 sans silice) ;

- l'application de silice à des doses beaucoup plus importantes favoriserait au contraire le développement général des plantes. Si on compare ces traitements aux témoins, il apparaît une amélioration sensible de la hauteur et du poids sec des plants à la récolte notamment pour 10 et 50 T/ha de scories, avec une masse de matière sèche de 16,8 g/pied et une hauteur de 34,3 cm à la récolte pour 10 T/ha de P_2O_5 contre 9,8 g/pied et 28,7 cm pour le témoin. Cependant, un amendement de 100 T/ha de scorie a un effet dépressif sur ces paramètres ;

- on peut escompter un meilleur comportement du maïs avec l'augmentation des quantités d'amendement phosphaté, le poids sec étant maximal pour 5 T P_2O_5 /ha.

4.2.2 - Teneurs en éléments minéraux des parties aériennes à la récolte

Le tableau 11 récapitule les teneurs mesurées pour les différents traitements.

On remarque :

- qu'il n'y a pas d'influence de la fertilisation siliceuse sur les teneurs des parties aériennes quelque soit la dose ou la forme employées ;

- que les teneurs des plants en silice et en magnésium sont plus élevées pour le traitement à 10 T/ha de scories. La teneur en calcium diminue lorsqu'on augmente l'amendement siliceux. La teneur en fer baisse fortement pour les doses supérieures à 5 T/ha de scories et celle du potassium semble inversement proportionnelle au développement des végétaux avec un minimum à 10 T/ha et un maximum à 100 T/ha ;

Tableaux 7 à 10 :

TEST 1BIS / FERRALLITIQUE - FORME-DOSE FUMURE SILICE -

HAUTEUR DES PLANTS AU 28^{ème} JOUR (cm)

Dose Forme	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	moyenne
ciment	22,65	26,00	27,20	24,65	25,13
scories	23,85	25,20	28,65	21,70	24,85
SiO ₂	25,75	23,95	27,20	25,30	25,55
moyenne	24,08	25,05	27,68	23,88	

MATIERE SECHE A LA RECOLTE (g)

Dose Forme	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	moyenne
ciment	7,7	7,9	9,2	7,4	8,0
scories	8,3	9,1	10,4	5,4	8,3
SiO ₂	7,3	7,1	6,2	8,9	7,4
moyenne	7,8	8,0	8,6	7,2	

TEST 1BIS - ANNEXES : Hauteur au 28^{ème} jour et Matière Sèche

AMENDEMENT SILICE

paramètre dose	H28 (cm)	MS (g)
5 T/ha	27,80	13,6
10 T/ha	34,30	16,8
50 T/ha	34,30	13,3
100 T/ha	17,40	5,4
moyenne	28,45	12,3

AMENDEMENT P₂O₅

paramètre dose	H28 (cm)	MS (g)
3 T/ha	28,75	9,8
5 T/ha	28,75	14,5
7 T/ha	26,50	12,0
10 T/ha	20,50	9,0
moyenne	26,13	11,3

Terre d'alluvion : moyenne : H28 = 22 cm ; MS = 8,1 g

Figure 4 : HAUTEUR DES PLANTS A LA RECOLTE SUIVANT
LES DIFFERENTES DOSES ET FORMES DE SILICE
APPORTEES

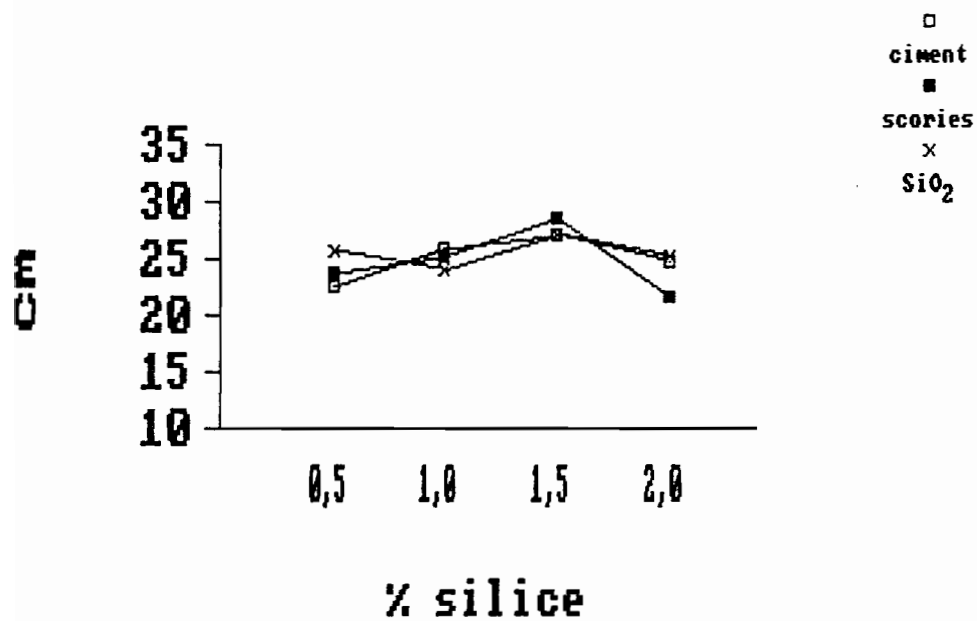


Figure 5 : EVOLUTION DE LA CROISSANCE DES PLANTS EN FONCTION DE LA QUANTITE DE SCORIE

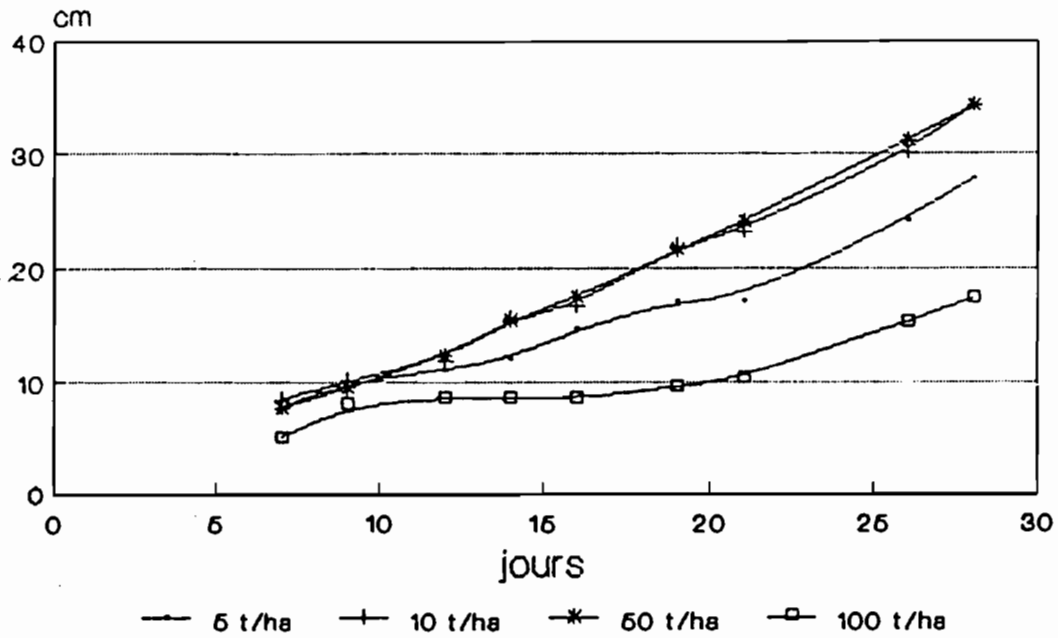


Figure 6 : EVOLUTION DE LA CROISSANCE DES PLANTES AYANT RECU DIFFERENTES DOSES DE PHOSPHORE

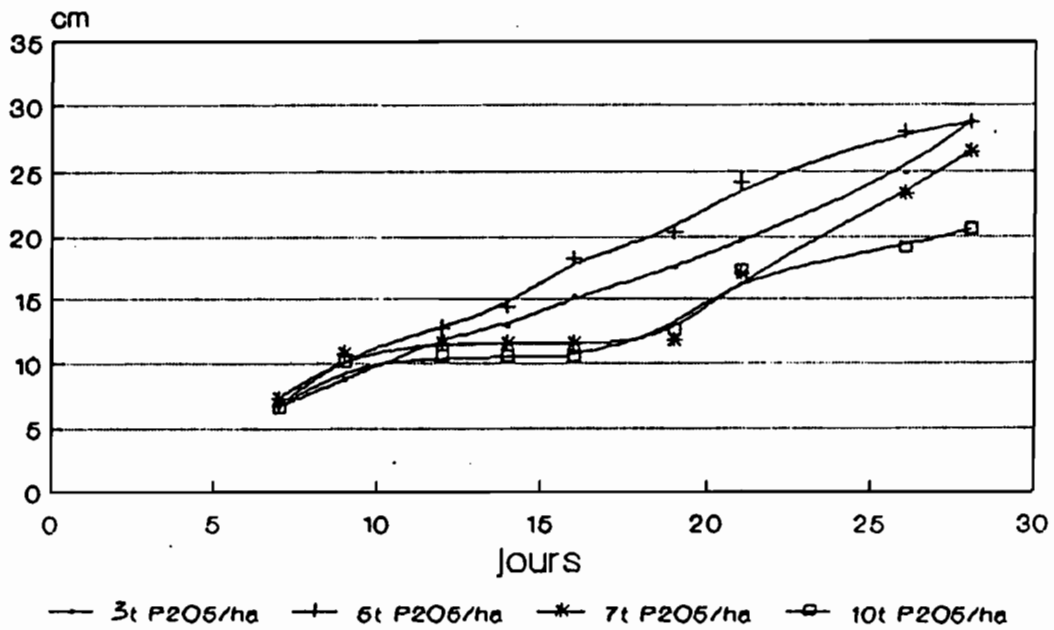


Tableau 11 : RECAPITULATIF ANALYSES VEGETALES -TEST SERRE N°1 BIS/FERRALLITIQUE -TENEURS (%)-

TRAITEMENT	SiO ₂	Cendres	N	P	Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Ni	Cr	Co
11	1,50	10,25	2,700	0,116	0,640	0,243	3,445	0,004	0,450	0,097	0,009	0,019	0,003
12	1,07	11,05	2,837	0,129	0,714	0,192	3,703	0,005	2,023	0,098	0,030	0,061	0,004
13	0,78	10,67	2,741	0,122	0,631	0,180	3,903	0,002	0,238	0,090	0,006	0,006	0,003
21	0,97	9,21	2,862	0,123	0,660	0,255	3,178	0,004	0,178	0,094	<0.001	0,003	0,003
22	0,92	9,64	2,704	0,131	0,735	0,248	3,295	0,002	0,105	0,095	<0.001	<0.002	0,003
23	1,43	11,61	2,708	0,119	0,656	0,205	4,003	0,004	0,315	0,099	0,007	0,005	0,003
31	0,73	10,28	2,851	0,122	0,574	0,223	3,733	0,002	0,150	0,086	<0.001	0,003	0,003
32	0,81	8,69	2,717	0,142	0,839	0,300	2,745	0,005	0,160	0,094	<0.001	0,003	0,003
33	0,62	11,30	2,844	0,147	0,660	0,196	4,175	0,002	0,163	0,093	0,006	<0.002	0,003
41	1,30	10,80	2,900	0,134	0,718	0,207	3,743	0,002	0,125	0,093	<0.001	<0.002	0,003
42	1,06	11,21	3,078	0,114	0,715	0,185	4,060	0,003	0,113	0,123	0,005	<0.002	0,003
43	1,10	10,06	2,613	0,121	0,713	0,207	3,420	0,004	0,148	0,091	0,005	<0.002	0,002
55	0,77	8,65	2,712	0,132	0,763	0,213	2,905	0,006	0,458	0,079	0,012	<0.002	0,003
S10	1,25	7,52	2,412	0,118	0,733	0,318	2,068	0,002	0,075	0,089	0,005	<0.002	0,002
SS0	0,80	7,14	2,688	0,119	0,594	0,276	2,308	0,001	0,105	0,082	<0.001	<0.002	0,002
S100	0,90	10,00	2,990	0,137	0,551	0,172	3,618	0,002	0,105	0,074	<0.001	<0.002	0,002
62	1,30	10,29	2,661	0,130	0,753	0,225	3,440	0,002	0,108	0,096	<0.001	<0.002	0,003
72	0,01	8,27	2,752	0,145	0,765	0,373	2,358	0,004	0,673	0,108	0,014	0,013	0,004
82	1,52	9,49	3,176	0,247	0,615	0,308	2,980	0,003	0,445	0,102	0,011	0,007	0,003
92	1,31	9,14	3,224	0,329	0,639	0,307	2,948	0,003	0,143	0,126	0,005	<0.002	0,002
Sol alluvion	2,25	12,2	3,19	0,24	0,35	0,39	3,13	0,002	0,095	0,037	-	-	-

- que des doses croissantes de phosphore entraînent une augmentation des teneurs en azote et en phosphore des parties aériennes au point de dépasser les valeurs obtenues sur le sol d'alluvion. Par ailleurs, de fortes teneurs en fer sont observées pour 5 et 7 T P_2O_5 /ha.

4.2.3 - Analyses de sol après la récolte

Ces analyses sont récapitulées sur le tableau 12.

On observe :

- une augmentation du calcium échangeable lorsqu'on accroît la fertilisation en silice et ce quelqu'en soit la source. Globalement, le rapport de la somme des bases échangeables sur la capacité d'échange cationique augmente de pair. Cela se retrouve aussi pour le calcium total. Cette augmentation systématique de calcium se comprend mal car seul le ciment apporte du calcium ;

- un effet des doses croissantes d'amendement phosphaté avec une augmentation du calcium et du magnésium échangeables, de la capacité d'échange, du calcium total et du phosphore assimilable et total ;

- que les doses croissantes d'amendement siliceux semblent entraîner au contraire une diminution du calcium échangeable et total et surtout une augmentation, logique, du magnésium total.

4.3 - CONCLUSION

L'apport de doses de silice inférieures ou égales à 500 kg/ha ne semble donc pas avoir d'influence sur le développement et les teneurs du maïs.

Par contre, des quantités importantes de silice, apportées sous forme de scories du nickel et comprises entre 10 et 50 T/ha de scories, semblent avoir une influence positive sur le développement de la plante.

De même, l'accroissement des doses de phosphore paraît entraîner un meilleur développement des plants et l'obtention de teneurs très satisfaisantes des parties aériennes en azote et en phosphore. Cependant, l'apport de 10 T P_2O_5 /ha semble avoir un effet dépressif sur les maïs et cette dose est vraisemblablement trop élevée.

Ces constats nous ont donc amenés à consacrer une nouvelle étude à l'influence de doses croissantes de ces deux amendements, siliceux et phosphaté.

Tableau 12 : TEST D'ORIENTATION EN SERRE/FERRALLITIQUE -RESULTATS DES ANALYSES DE SOL

TRAITEMENT	pH-eau	pH-KCl	BASES ECHANGEABLES meq/100 g de terre					CEC	P ₂ O ₅ assim. OLSEN (%)	P ₂ O ₅ TOTAL (%)	SiO ₂ (%)	BASES TOTALES (%)				
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Somme					CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Somme
11	5,7	5,6	2,03	0,31	0,07	0,16	2,58	3,5	0,071	1,39	1,95	3,43	9,50	0,06	0,10	13,10
12	6,2	5,9	2,93	0,22	0,08	0,13	3,37	3,1	0,077	1,42	1,91	5,00	9,64	0,03	0,07	14,73
13	6,4	5,8	3,00	0,20	0,08	0,13	3,41	3,1	0,115	1,02	2,00	4,91	9,18	0,04	0,12	14,25
21	6,1	5,9	2,58	0,31	0,04	0,12	3,05	3,3	0,089	1,67	1,98	4,56	9,42	0,00	0,05	14,03
22	6,1	6,0	3,18	0,23	0,04	0,12	3,56	3,1	0,096	0,62	1,94	5,06	9,68	0,03	0,09	14,85
23	6,1	6,1	3,02	0,24	0,05	0,09	3,40	3,2	0,080	1,10	1,96	5,27	9,25	0,08	0,11	14,71
31	5,9	5,7	2,96	0,45	0,05	0,13	3,59	3,5	0,092	1,42	1,97	4,93	9,36	0,00	0,09	14,38
32	6,2	6,0	3,28	0,33	0,03	0,12	3,75	3,3	0,081	1,39	1,96	5,21	9,36	0,11	0,19	14,87
33	6,3	6,1	3,19	0,29	0,04	0,10	3,62	3,2	0,083	0,55	1,98	7,72	9,43	0,06	0,10	17,31
41	6,3	6,1	3,39	0,30	0,05	0,13	3,88	3,3	0,084	1,24	1,97	5,42	9,78	0,04	0,16	15,39
42	6,4	6,0	3,38	0,29	0,12	0,10	3,88	3,4	0,105	1,59	1,93	5,47	9,79	0,09	0,11	15,47
43	6,2	6,0	3,27	0,30	0,04	0,12	3,72	2,9	0,068	1,03	1,94	5,24	9,78	0,04	0,11	15,17
62	6,1	6,0	3,29	0,27	0,04	0,12	3,72	3,6	0,077	1,43	2,61	5,72	9,68	0,03	0,09	15,52
72	6,0	5,8	3,70	0,26	0,01	0,09	4,06	4,0	0,193	1,57	1,96	6,86	9,57	0,02	0,10	16,56
82	6,0	5,9	4,77	0,35	0,08	0,12	5,32	5,1	0,387	2,82	2,04	9,04	9,74	0,03	0,12	18,93
92	6,0	5,7	5,62	0,41	0,10	0,12	6,25	6,3	0,584	2,91	1,97	11,19	9,74	0,07	0,11	21,11
S5	6,1	5,9	3,40	0,32	0,08	0,14	3,93	3,4	0,072	1,31	2,11	5,16	10,49	0,04	0,10	15,79
S10	6,2	6,0	2,92	0,27	0,00	0,11	3,30	2,9	0,094	1,24	1,95	5,01	10,27	0,00	0,14	15,43
S50	6,2	5,9	2,97	0,32	0,06	0,11	3,46	3,0	0,071	1,78	2,19	5,04	14,64	0,06	0,09	19,82
S100	6,2	6,0	2,80	0,26	0,10	0,14	3,30	2,8	0,056	1,02	2,39	4,63	22,08	0,07	0,10	26,86

5 - DEUXIEME ETUDE EN VASES DE VEGETATION : EFFETS D'UN AMENDEMENT SIMULTANE DE PHOSPHORE ET DE SILICE

5.1 - PROTOCOLE EXPERIMENTAL

L'objectif de cette deuxième expérimentation en serre consistait à vérifier l'effet positif d'un amendement siliceux sur la croissance, effet suggéré par le test d'orientation, et ce en fonction de la dose d'amendement phosphaté. Suite aux résultats du test d'orientation, nous avons porté la dose maximale de phosphore à 4,5 T/ha de P_2O_5 .

Trois doses de phosphore et cinq doses de silice ont ainsi été étudiées :

- P_2O_5 : dose 1 : 1,5 T/ha ¹
dose 2 : 3,0 T/ha
dose 3 : 4,5 T/ha
- Scorie : dose 1 : 8 T/ha
dose 2 : 16 T/ha
dose 3 : 24 T/ha
dose 4 : 32 T/ha
dose 5 : 40 T/ha

Un amendement calcique de 2,1 T/ha de CaO -dose choisie compte-tenu de la forte teneur des scories en magnésie- et une fumure complète ont été appliqués sur tous les traitements.

Le dispositif retenu est un essai en blocs factoriels complets et équilibrés, comportant 5 répétitions et 150 pots. L'étude a duré 28 jours, du semis à la récolte.

Outre les mesures habituelles de hauteur et de poids sec, nous avons mesuré la consommation en eau des plants. Partant d'un poids d'eau de 3,5 kg/pot, nous avons pesé la totalité de l'eau restant dans les cuvettes avant chaque remise à niveau, estimant ainsi l'évapotranspiration.

Le protocole détaillé est porté en annexe 2.

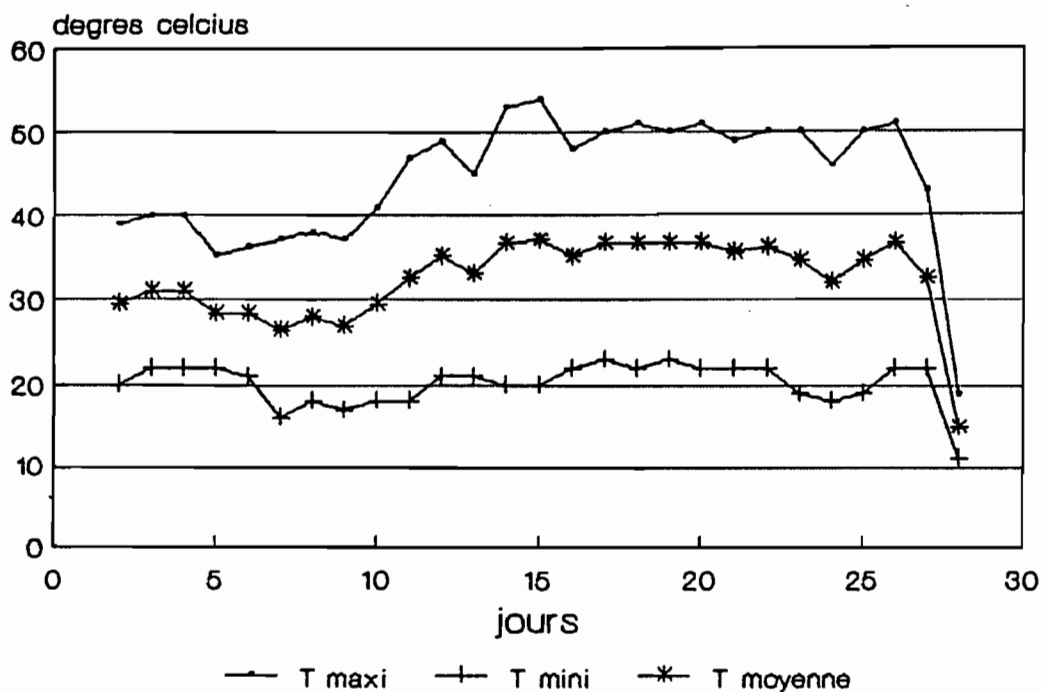
5.2 - MESURES ET OBSERVATIONS : RESULTATS

5.2.1 - Températures dans la serre durant la conduite de l'essai

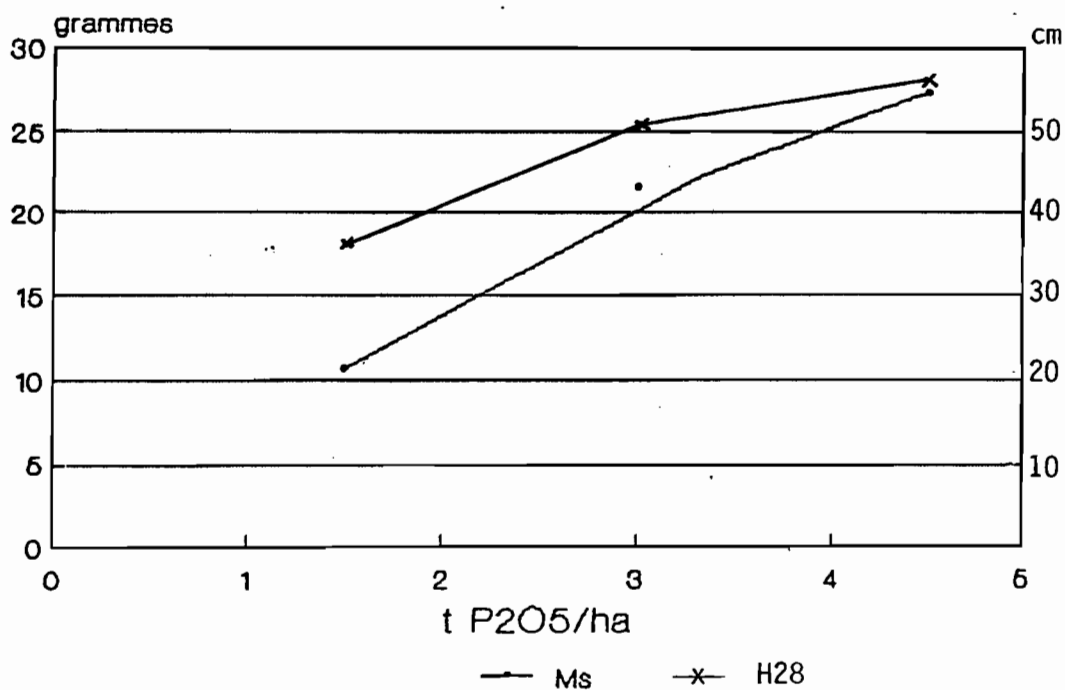
L'expérimentation s'est déroulée du 25 Octobre au 22 Novembre. Les températures enregistrées dans la serre sont portées sur la figure 7.

¹ dans la numérotation des traitements, le premier chiffre correspond à la dose de P_2O_5 et le second à celle de la scorie

**Figure 7 : TEMPERATURES DANS LA SERRE
LORS DE LA DEUXIEME ETUDE**



**Figure 8 : HAUTEUR ET POIDS SEC DES VEGETAUX A LA RECOLTE
SELON LES DOSES DE PHOSPHORE**



Contrairement à la première expérimentation, cette deuxième étude s'est déroulée en début de saison chaude et l'augmentation de la température et de la durée de l'insolation ont favorisé le développement des plants. Ainsi, lors de la première étude, la hauteur au 28ème jour et le poids sec étaient, pour le traitement à 3 T/ha de P_2O_5 et 2,1 T/ha de CaO, respectivement de 27,9 cm et 5,9 g/pot alors que ces mêmes valeurs s'élevaient pour la deuxième étude à 51,6 cm et 21,6 g pour le même traitement.

5.2.2 - Comportement de la plante en cours de végétation ; développement atteint à la récolte

L'analyse de variance (cf. tableau 13) montre qu'il existe un effet très significatif de la dose de phosphore sur la hauteur, à compter du 12ème jour. Les pieds les plus hauts sont ceux ayant reçu 4,5 T/ha de P_2O_5 .

La vitesse de croissance, la consommation en eau ainsi que le poids de matière sèche, le nombre de feuilles et la hauteur totale à la récolte suivent exactement les mêmes tendances, avec des valeurs qui augmentent avec la quantité de phosphore et qui se rapprochent entre 3 et 4,5 T P_2O_5 /ha.

La figure 8 illustre cette évolution pour la hauteur et le poids de matière sèche des plants à la récolte.

Ceci étant, et comme le montre la figure 9, on observe qu'entre le 9ème et le 13ème jour les vitesses journalières de croissance diminuent. Deux hypothèses peuvent être avancées :

- au stade 3-4 feuilles (niveau atteint par la culture durant l'expérimentation entre le 10ème et le 12ème jours), la plante marque une pause dans le développement de ses parties aériennes ;

- au stade 5-6 feuilles, le système racinaire séminal cesse d'alimenter la plante : le relais est alors pris par les racines coronaires. C'est une période critique où la plante, si elle subit un stress, peut être mal alimentée. Dans le cas présent, les températures maximales journalières ont dépassé soudainement les 50° C, alors que les plants entraient dans cette phase de transition.

L'influence de la scorie est beaucoup moins nette que celle du phosphore. Le tableau 13 montre que la scorie ne possède un effet significatif que sur la hauteur des plants aux 19ème, 23ème et 28ème jours et sur la vitesse de croissance du 16ème au 19ème jour. Les écarts observés (cf. fig. 10) sont assez faibles avec, au 28ème jour, une hauteur maximale de 50,9 cm pour la dose 3 (24 T scories/ha) et une hauteur minimale de 45,8 cm pour la dose 4.

Tableau 13 : ANALYSES DE VARIANCE -ESSAI SERRE N°2/FERRALLITIQUE

PARAMETRES (#)	Moy. Gén.	PROB. EFFET SIGNIFICATIF				Coeff. varia. (%)	EFFETS SIGNIFICATIFS SUR					
		P	Si	P x S	Bloc		PHOSPHORE P1 P2 P3			BLOC par or- dre décroi.	SCORIE	P X S
H 6	6,204	-	-	-	0,993	11,31	-			2-3-1-4-5	-	-
H 9	11,176	-	-	-	0,964	8,51	-			2-3-1-4-5	-	-
H 12	14,502	0,994	-	-	0,964	8,63	13,84 < 14,67 = 15,00			2-3-1-4-5	-	-
H 14	15,568	0,9998	-	-	-	8,79	14,49 < 16,00 = 16,22			-	-	-
H 16	17,105	1,000	-	-	-	8,96	15,54 < 17,64 = 18,14			-	-	-
H 19	20,947	1,000	0,952	-	-	7,64	18,41 < 21,49 < 22,94			-	3>5=4=2=1	-
H 21	24,497	1,000	-	-	-	8,17	20,82 < 25,71 < 26,96			-	-	-
H 23	28,722	1,000	0,980	-	-	9,18	23,57 < 29,99 < 32,61			-	3>5=2=4=1	-
H 28	48,079	1,000	0,954	-	-	10,29	36,27 < 50,59 < 57,38			-	3=5>2=1=4	-
HTr	139,28	1,000	-	-	0,978	7,08	120,8 < 144,4 < 152,7			5-3-1-4-2	-	-
V 96	1,657	0,987	-	-	-	12,42	1,555 < 1,699 = 1,718			-	-	-
V 129	1,109	1,000	-	-	-	19,05	0,923 < 1,159 = 1,244			-	-	-
V 1412	0,533	0,9999	-	-	0,986	48,29	0,325 < 0,611 = 0,663			1-5-4-3-2	-	-
V 1614	0,769	0,999	-	-	-	49,56	0,524 < 0,823 = 0,959			-	-	-
V 1916	1,281	1,000	0,999	-	-	27,23	0,957 < 1,283 < 1,603			-	3=5=4>2=1	-
V 2119	1,775	1,000	-	-	-	29,23	1,206 < 2,007 = 2,112			-	-	-
V 2321	2,112	1,000	-	-	-	27,93	1,375 < 2,138 < 2,824			-	-	-
V 2823	3,871	1,000	-	-	0,969	16,40	2,540 < 4,119 < 4,956			5-3-2-4-1	-	-
PCu 62	62,623	-	-	-	0,996	23,78	-			5-4-1-2-3	-	-
PCu 96	86,542	-	-	-	-	76,17	-			-	-	-
PCu 129	97,291	0,953	-	-	1,000	11,69	93,51 < 96,78 < 101,59			5-4-1-2-3	-	-
PCu 1612	182,437	1,000	-	-	-	10,05	153,06 < 187,12 < 207,13			-	-	-
PCu 1916	243,860	1,000	-	-	0,995	9,41	189,6 < 250,5 < 291,4			5-4-1-2-3	-	-
PCu 2119	334,827	1,000	-	-	-	12,53	240,1 < 354,2 < 410,1			-	-	-
PCu 2321	419,150	1,000	-	-	-	11,85	296,6 < 447,5 < 513,3			-	-	-
Nbfrécolte	7,633	1,000	-	-	-	6,02	7,080 < 7,820 = 8,000			-	-	-
Mat.sèche	19,849	1,000	-	-	0,994	14,57	10,60 < 21,61 < 27,34			5-4-3-1-2	-	-
pH Perc.	5,967	-	-	-	-	14,19	=			=	=	=

hauteurs (H) et vitesses (V) exprimées en cm et cm/jour et consommation en eau (Pcu) exprimée en g, les chiffres correspondant aux jours d'observations. La matière sèche est exprimée en grammes

Figure 9 : VITESSE DE CROISSANCE DES PLANTES SUIVANT LES DOSES DE PHOSPHORE

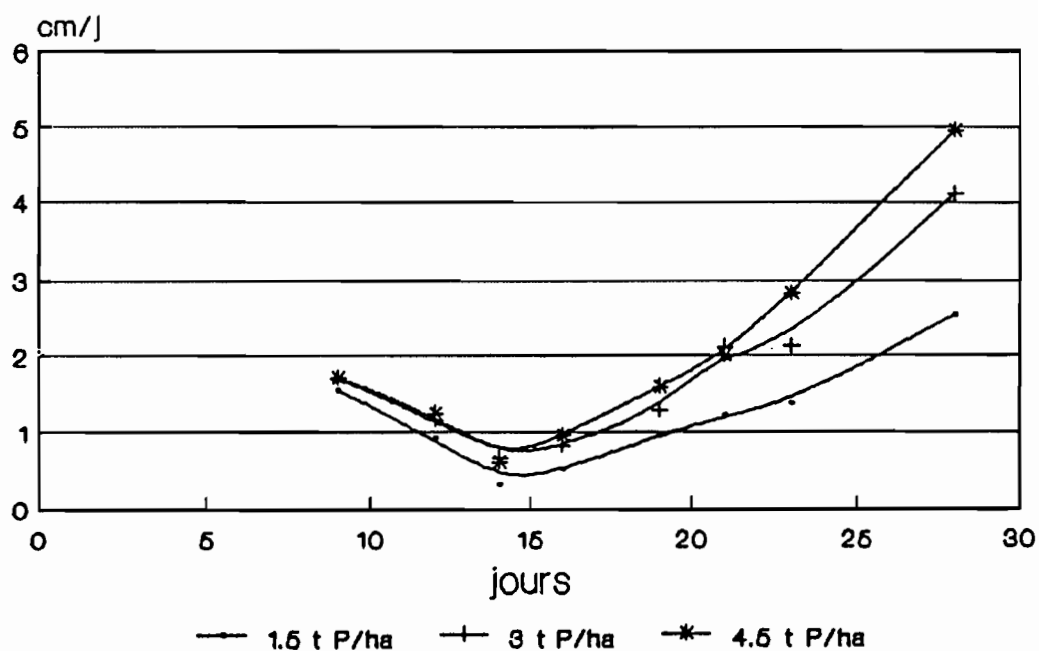
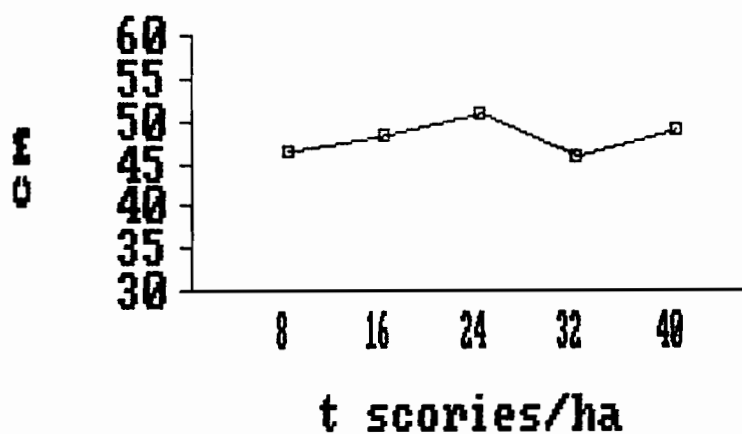


Figure 10 : HAUTEUR DES PLANTS A LA RECOLTE EN FONCTION DES DOSES DE SCORIES



Enfin, et de manière générale, il apparaît, sur la majorité des plants, des décolorations internervaires jaunâtres, en bandes continues, qui apparaissent sur les jeunes feuilles et disparaissent lorsque la feuille vieillit.

Par ailleurs, sur certains plants ayant reçu une dose 3 de phosphore, on a pu noter la présence de rejets se formant à partir de la deuxième feuille.

5.2.3 - Teneurs et immobilisations des parties aériennes à la récolte

Les teneurs et les immobilisations des parties aériennes ont été mesurées sur chaque parcelle élémentaire, les matières sèches des deux pots étaient regroupées pour constituer un seul échantillon. Une analyse de variance a donc pu être réalisée sur les teneurs en différents éléments et sur leurs valeurs dérivées (cf. tableaux 14 et 15).

On constate que la quantité de phosphore apportée a un effet hautement ou très hautement significatif sur toutes les teneurs mesurées sauf sur celle de la silice. Quand on augmente la dose de phosphore, on observe :

- une diminution des teneurs en cendres, azote, potassium, sodium, fer, nickel et chrome,

- une augmentation des teneurs en phosphore, magnésium, manganèse et cobalt,

- une teneur en calcium maximale pour la dose intermédiaire.

La dose d'amendement phosphaté a également un effet significatif sur la plupart des rapports dérivés et des immobilisations avec des valeurs qui augmentent avec la quantité apportée.

Au contraire, la dose de scorie n'exerce un effet significatif que sur la teneur en calcium et ses rapports dérivés. La teneur en calcium est maximale pour les doses de scories 3 et 4. On observe également une interaction phosphore-silice qui montre que l'augmentation de la teneur en calcium due à la scorie est plus forte dans le cas d'un amendement phosphaté de 1,5 T/ha.

Enfin, le bloc 3 apparaît comme souvent différent des autres blocs, ce qui est sans doute dû à sa position plus favorable dans la serre (au centre et au fond).

Les teneurs obtenues sont en moyenne satisfaisantes, avec cependant des valeurs basses pour la silice et des valeurs élevées pour le calcium, le fer et le manganèse.

Tableau 14 : RECAPITULATIF ANALYSES VEGETALES -ESSAI SERRE N°2/FERRALLITIQUE

-TENEURS-

PARAMETRE	Moy. gén.	EFFET SIGNIFICATIF SUR				Coefficient variation (%)	EFFETS SIGNIFICATIFS		
		P	Si	P x S	Bloc		Phosphore	Bloc par ordre décroissant	Scorie par ordre décroissant
CENDRES	8,568	***			*	7,584	P1>P2>P3	1 - 2 - 5 - 3	
SILICE	1,097					19,400			
AZOTE	2,854	***			***	8,706	P1=P2>P3	5 - 1 - 4 - 2 - 3	
PHOSPHORE	0,185	***				8,967	P3>P2>P1		
CALCIUM	0,665	***	***	***	**	14,318	P2>P3>P1	1 - 2 - 3 - 5 - 4	S5 - S1 - S2 - S3 - S4
MAGNESIUM	0,390	***				10,084	P3>P2>P1		
POTASSIUM	2,445	***			*	12,791	P1>P2>P3	5 - 4 - 1 - 2 - 3	
SODIUM	0,005	**			*	71,475	P1>P2=P3	4 - 3 - 2 - 5 - 1	
FER	0,181	***			**	58,827	P1>P2=P3	3 - 2 - 4 - 1 - 5	
MANGANESE	0,104	***				15,102	P3>P2>P1		
NICKEL	0,004	***				55,022	P1>P2=P3		
CHROME	0,001	**				196,314	P1>P2=P3		
COBALT	0,004	***				18,504	P3=P2>P1		

Tableau 15 : RECAPITULATIF ANALYSES VEGETALES -ESSAI SERRE N°2/FERRALLITIQUE -RAPPORTS ET IMMOBILISATIONS

PARAMETRE	Moy. gén.	EFFET SIGNIFICATIF SUR				Coefficient variation (%)	EFFETS SIGNIFICATIFS		
		P	Si	P x S	Bloc		Phosphore	Bloc par ordre décroissant	Scorie par ordre décroissant
Hg/Ca	0,628	**	***	***	-	16,42	P1=P2<P3	-	S4 - S3 - S5 - S2 - S1 (0,755) (0,551)
Hg/SiO ₂	0,370	***	-	-	-	23,64	P1<P2=P3	-	-
Ca/SiO ₂	0,632	-	**	**	-	26,64	-	-	S1 - S2 - S5 - S3 - S4 (0,715) (0,514)
Hg+Ca/SiO ₂	1,001	*	*	-	-	24,00	P1<P2=P3	-	S1 - S2 - S5 - S3 - S4 (1,096) (0,873)
InFe	3,169	*	-	-	**	39,23	P1<P2=P3	3 - 4 - 5 - 2 - 1	-
InMn	2,144	***	-	-	-	24,78	P1<P2<P3	-	-
InNi	0,067	-	-	-	-	30,80	-	-	-
InCr	0,019	-	-	*	-	165,7	-	-	-
InCo	0,080	***	-	-	-	21,15	P1<P2<P3	-	-
InSi	217,92	***	-	-	-	23,89	P1<P2<P3	-	-
InN	553,24	***	-	-	***	11,15	P1<P2<P3	5 - 4 - 1 - 3 - 2	-
InP	38,75	***	-	-	**	14,49	P1<P2<P3	5 - 4 - 3 - 1 - 2	-
InCa	132,91	***	-	-	-	19,05	P1<P2<P3	-	-
InMg	82,704	***	-	-	-	20,10	P1<P2<P3	-	-
InK	428,20	***	-	-	***	9,35	P1<P2<P3	5 - 4 - 1 - 3 - 2	-
InNa	0,925	*	-	-	***	43,27	P1<P2<P3	4 - 3 - 5 - 1 - 2	-

5.2.4 - Mesures sur le sol après la récolte

L'analyse de variance effectuée sur les résultats des analyses de sol (cf. tableau 16) montre qu'il existe un effet très hautement significatif de la quantité d'engrais phosphaté sur tous les paramètres étudiés, exception faite du pH-KCl.

Le pH-eau augmente modérément avec la dose de superphosphate, ce qui peut être attribué au rôle alcalinisant du calcium présent dans cette forme d'engrais. Cette présence explique également l'augmentation du calcium échangeable.

Au contraire, les teneurs des trois autres éléments échangeables analysés, le magnésium, le potassium et le sodium, sont inférieures dans le cas d'un apport de 4,5 T P₂O₅/ha.

Par ailleurs, comme cela avait déjà été constaté pour la première étude, on observe une augmentation de la capacité cationique d'échange avec les doses d'amendement phosphaté ainsi qu'une amélioration notable du taux de phosphore assimilable dans le sol.

La rétention par le sol du phosphore apporté a été déterminée de deux manières : la première, par une analyse en laboratoire selon une technique utilisée en Nouvelle-Zélande ¹, la deuxième méthode consistant à déduire cette valeur par calcul.

soit Pap le phosphore apporté
Pf le phosphore fixé
Pas le phosphore assimilable
PI le phosphore immobilisé par la plante
Ppe le phosphore entraîné dans le percolat.

$$\text{Pap} = \text{Pf} + \text{Pas} + \text{PI} + \text{Ppe}$$

Ppe étant négligeable,

$$\text{Pf} = \text{Pap} - \text{Pas} - \text{PI}$$

et le pourcentage de rétention en phosphore est donc :

$$\text{RETP1} = \frac{\text{Pap} - \text{Pas} - \text{PI}}{\text{Pap}} \times 100$$

Cette valeur, ainsi que celle issue de l'analyse de laboratoire (RETP2) ont fait l'objet d'une analyse de variance (cf. tableau 16).

¹ : Cette analyse consiste à laisser 5 g de terre en contact avec 25 ml de solution à 1 g de P/l à pH 4,6 pendant 24 heures à température ambiante. Puis on centrifuge et on dose sur le filtrat la quantité de phosphore restant en solution et on en déduit la quantité de phosphore fixé.

TABLEAU 16 : RECAPITULATIF ANALYSES DE SOL -ESSAI SERRE N°2/FERRALLITIQUE

PARAMETRES	Moy. Gén.	EFFET SIGNIFICATIF SUR				Coeff. varia. (%)	EFFETS SIGNIFICATIFS SUR					
		P	Si	P x S	Bloc		PHOSPHORE			SCORIE	BLOC	
						P1	P2	P3	par ordre décroissant	par ordre décroissant		
pH-EAU	6,171	***	***	-	-	1,11	6,11	< 6,16	< 6,24	S4 - S3 - S5 - S2 - S1 (6,22) (6,11)	-	
pH-KCl	6,103	-	**	*	-	0,66		-		S4 - S3 - S2 - S5 - S1 (6,14) (6,09)	-	
Ca échangeable	2,877	***	-	-	-	9,54	2,48	< 2,88	< 3,27	-	-	
Mg échangeable	0,209	***	**	-	-	31,4	0,25	= 0,22	> 0,16	S5 - S3 - S4 - S2 - S1 (0,25) (0,16)	-	
K échangeable	0,041	***	***	***	*	61,0	0,08	> 0,03	> 0,01	S2 - S1 - S3 - S5 - S4 (0,06) (0,02)	5 - 2 - 4 - 1 - 3	
Na échangeable	0,139	***	-	***	-	20,46	0,15	< 0,16	> 0,11	-	-	
CEC	2,276	***	-	-	-	14,06	1,68	< 2,26	< 2,90	-	-	
SBE	3,266	***	-	-	-	9,85	2,91	< 3,29	< 3,55	-	-	
SBE/CEC	1,502	***	*	-	-	10,36	1,79	> 1,47	> 1,24	S3 - S4 - S2 - S1 - S5 (1,60) (1,43)	-	
P ₂ O ₅ assimilable	0,103	***	-	-	-	17,38	0,047	< 0,096	< 0,166	-	-	
P ₂ O ₅ total	1,282	***	-	**	-	11,79	0,67	< 1,30	< 1,87	-	-	
RETP 2	68,01	***	-	-	-	1,24	69,5	> 67,9	> 61,6	-	-	
RETP 1	88,80	**	-	-	-	2,37	89,6	= 89,2	> 87,6	-	-	

Bases échangeables et CEC exprimées en meq/100 g

P₂O₅ assimilable et total exprimés en %.

RETP exprimés en %

On observe dans les deux cas que le pourcentage de rétention du phosphore est moins élevé pour 4,5 T P₂O₅/ha ce qui pourrait correspondre à un début de saturation des sites.

On constate d'autre part que la mesure en laboratoire donne des résultats inférieurs aux calculs (65 % au lieu de 90 %) ce qui signifie peut-être que le temps de contact prévu dans cette manipulation est insuffisant.

Enfin, la mesure du phosphore total par gravimétrie montre une interaction phosphore - silice et des différences importantes entre les différentes doses de silice pour un même apport de phosphore difficiles à expliquer. En effet :

soit Pp le phosphore initialement présent dans le sol
et PT le phosphore total

$$PT = Pf + Pp + Pas$$

Or, Pp est une constante et Pf et Pas ne varient pas en fonction de la silice apportée.

En ce qui concerne l'amendement siliceux, la quantité de scorie apportée a un effet significatif mais cependant minime sur les pH-eau et KCl.

On observe également une augmentation du magnésium échangeable avec celle de la scorie qui est sans doute due à la proportion de magnésium dans cet amendement. Le potassium échangeable diminue au contraire avec les fortes doses de scories.

5.2.5 - Mesures sur les percolats à la récolte

L'analyse de variance (cf. tableau 13) ne montre pas d'effet significatif des amendements étudiés sur le pH des percolats. Le pH moyen des percolats est de 5,97.

5.3 - DISCUSSION

Les résultats obtenus confirment l'intérêt d'un amendement phosphaté très important et on peut constater que l'on n'atteint même pas le développement maximal du maïs avec un apport de 4,5 T P₂O₅/ha. Par contre, l'influence de la scorie n'est pas très nette.

Les teneurs des plants en éléments minéraux parviennent, exception faite de la teneur en silice, à un niveau satisfaisant.

Pour ce qui est de l'effet de l'amendement phosphaté sur le sol, on observe une amélioration de la capacité cationique d'échange et du phosphore assimilable.

En conclusion, on peut émettre l'hypothèse que la silice apportée n'ait pas été présentée sous une forme assez assimilable et que des doses encore plus élevées de phosphore soient encore susceptibles de marquer.

6 - DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION

Ces deux premières études expérimentales en serre et sur vases de végétation confirment donc l'extraordinaire carence en phosphore induite par la très forte fixation de l'ion PO_4^{---} par les oxydes métalliques du sol. De toute évidence, des amendements phosphatés de l'ordre de 4,5 t/ha de P_2O_5 sont encore insuffisants pour assurer une croissance en hauteur et un développement maxima. Les teneurs en phosphore des parties aériennes du maïs, teneurs qui augmentent avec la dose d'amendement phosphaté, sont d'ailleurs toujours inférieures aux teneurs habituellement constatées chez des plants de même âge installés dans des conditions de sols normales (sur alluvions récentes fertiles par exemple).

L'application de doses croissantes de phosphore entraîne, d'autre part, des modifications dans les équilibres de la minéralo-masse de la plante. On constate ainsi :

- une diminution des teneurs en azote, en potassium, en sodium, en fer, en nickel et en chrome ;

- une élévation des teneurs en manganèse et en cobalt.

L'interprétation à donner aux effets sur les métaux lourds est délicate dans la mesure où l'on situe encore très mal leurs seuils de toxicité dans ces conditions. On peut seulement faire l'hypothèse que les oxydes de nickel et de chrome du sol ont sans doute la même action sur le phosphore des amendements que les oxydes de fer. La saturation progressive des sites de fixation de P permet à la plante, d'un côté de mieux absorber le phosphore, de l'autre d'être mieux protégée des ions Fe, Ni et Cr. Par contre, les effets inverses des doses croissantes de P sur l'absorption croissante du manganèse et du cobalt sont difficiles à expliquer.

Les très faibles teneurs en silice de ce type de sol (de l'ordre de 1 à 3 % de SiO_2) entraînent, de leur côté, de faibles teneurs en cet élément dans les parties aériennes du maïs. L'application d'un amendement silico-magnésien semble alors avoir une action favorable sur la croissance en hauteur de la plante. Mais cette action est très modeste - presque fugace - et n'apparaît pas significative à la récolte, notamment sur la teneur en silice des plants. On remarque, cependant, une action très hautement significative sur l'assimilation du calcium et, corrélativement, sur les rapports magnésium/calcium et calcium/silice.

Les très forts tonnages en scories testés ont naturellement agit sur le sol soit par le biais de la silice soit par celui du magnésium.

Aucune interaction entre silice et phosphore n'apparaît au niveau de la croissance de la plante. On en observe quelques unes néanmoins au niveau de la teneur en calcium, du rapport Mg/Ca et du rapport Ca/SiO₂ assez difficiles à expliquer dans l'état actuel de nos connaissances.

Finalement, les difficultés les plus grandes de mise en valeur de ce type de sol se situent actuellement au niveau du phosphore.

Le rôle de la matière organique en tant qu'élément susceptible de limiter la fixation du phosphore devra être étudié dans une prochaine étude. Par ailleurs, la possibilité d'être aux prises avec des toxicités métalliques n'est pas à exclure. Enfin, l'influence à moyen et long termes des amendements phosphatés est une question qui vient immédiatement à l'esprit, mais qui ne pourra être abordée pratiquement qu'avec la mise en place et le suivi d'une expérimentation au champ de plusieurs années.

A N N E X E S

Annexe 1 - EFFET DE DIFFERENTES DOSES D'AMENDMENT PHOSPHATE ET CALCIQUE SUR SOL FERRALITIQUE : protocole expérimental de l'étude en vases de végétation

Annexe 2 - INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE SILICE COMBINEES A DES DOSES CROISSANTES DE PHOSPHORE : protocole expérimental de l'étude en vases de végétation

ANNEXE 1

EFFET DE DIFFERENTES DOSES D'AMENDEMENT PHOSPHATE ET CALCIQUE SUR SOL FERRALLITIQUE : ETUDE EN VASE DE VEGETATION

I - OBJECTIF

L'objectif de cette étude est double :

- évaluer la dose optimale d'amendement phosphaté à apporter sur le sol ferrallitique choisi pour l'expérimentation de base au champ. La rétrogradation du phosphore sur ce type de sol justifie un apport important d'engrais phosphaté. L'étude en serre devra permettre d'établir une courbe de réponse de la plante test (le maïs) à une dose croissante de phosphore.

- tester deux doses d'amendements calcique ; le pH de ce sol étant bas (5,0), il faut prévoir un amendement calcique afin de réduire la toxicité alumique et rendre le milieu plus compatible avec la culture du maïs.

II - ETUDE PREALABLE

Un test en laboratoire a préalablement permis de déterminer les deux doses d'amendement calcique : des doses croissantes de CaO ont été ajoutées à des échantillons de cette terre humidifiée et dépourvue d'engrais phosphaté. Les doses choisies pour l'essai en serre sont celles qui permettent d'obtenir après quelques jours des pH stabilisés à 5,6 et 6,2.

Les doses ainsi définies sont appliquées, sous forme de croûte calcaire titrant 42 % de chaux (origine Creek Aymes).

III - EXPERIMENTATION EN SERRE

1 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif retenu est un essai en blocs complets à parcelles subdivisées comprenant 6 répétitions (indicées k) :

1.1 - Le facteur principal est la dose d'amendement phosphaté. Il est indicé i :

- i = 1 pas d'amendement
- i = 2 pour 250 kg P₂O₅/ha
- i = 3 pour 500 kg P₂O₅/ha
- i = 4 pour 1000 kg P₂O₅/ha
- i = 5 pour 2000 kg P₂O₅/ha
- i = 6 pour 3000 kg P₂O₅/ha.

Chaque parcelle comporte 4 pots.

Les parcelles sont disposées dans l'ordre croissant ou décroissant des doses d'amendement phosphaté, pour éviter l'ombrage excessif des parcelles défavorisées par les plants les plus développés.

1.2 - Le facteur subsidiaire est la dose d'amendement calcique. Il est indiqué j :

j = 1 pour 0,7 T/ha de CaO
j = 2 pour 2,1 T/ha de CaO.

Chaque sous-parcelle comporte 2 pots, 1 (1 = 1 ou 2 selon l'orientation du pot). Les sous-parcelles sont disposées de façon aléatoire.

L'essai comporte donc 144 pots = 6 répétitions x 6 doses de phosphore x 2 doses de chaux x 2 pots.

2 - AMENDEMENTS ET FUMURE

2.1 - Amendement calcique

Les doses déterminées sont apportées sous forme de croûte calcaire et mélangées à la terre. On laisse l'eau circuler dans les vases de végétation pendant 15 jours avant le semis, afin que le calcium commence à se libérer dans le sol.

2.2 - Amendement phosphaté

Les 6 doses fixées sont apportées sous forme d'engrais superphosphate triple Ca $(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ titrant 44,45 % de P_2O_5 . L'amendement est mélangé 15 jours avant le semis, comme l'amendement calcique.

Les quantités de superphosphate à apporter par kg de terre (hypothèse de 3000 T de terre/ha) sont les suivantes :

Dose	Unités fertilisantes	mg d'engrais/kg de terre
1	0	0
2	250	187
3	500	375
4	1000	750
5	2000	1500
6	3000	2250

Le calcium contenu dans le superphosphate triple s'ajoute de façon non négligeable à l'amendement calcique déjà apporté d'où des valeurs de pH et de calcium nettement plus

élevées pour les pots recevant de fortes doses d'amendement phosphaté : cependant, l'effet de l'amendement calcique reste comparable pour un même indice i.

2.3 - La fumure complète

Elle est calculée à partir des immobilisations en azote et potasse dans les tiges, feuilles et grains au 164ème jour de végétation au champ. Les quantités d'éléments nécessaires à chaque plante sont apportées par la solution nutritive, sans tenir compte des éléments déjà présents dans le sol, pour être certain que ces éléments ne sont pas limitants. L'azote et la potasse sont apportés sous forme de nitrates. Les autres éléments sont le magnésium, le bore, le cuivre, le soufre, le molybdène et le zinc.

Le tableau ci-après détaille la composition de la solution nutritive et son fractionnement. Les apports d'oligo-éléments sont réalisés au semis et au 11ème jour. Le magnésium est apporté en une seule fois le 11ème jour. Les apports d'azote et de potasse sont réalisés au semis, au 11ème et au 18ème jour.

La concentration de la solution nutritive ne dépasse pas la valeur maximale acceptable de 20 milliéquivalents.

Les calculs de la fumure complète sont faits sur la base de 6,8 kg de terre sèche par pot.

3 - **CONDITIONS DE L'EXPERIMENTATION**

Les vases de végétation utilisés sont ceux mis au point par le Laboratoire d'Agronomie du Centre ORSTOM de Nouméa.

La durée de l'expérimentation est fixée à 28 jours : au-delà les distortions entre la croissance du plant en serre et au champ sont trop importantes.

Les graines, calibrées, sont placées en prégermination 48 heures avant le repiquage. Les jeunes plants sont protégés du soleil par une ombrière pendant plusieurs jours.

La solution nutritive complète est apportée lors de l'installation des plants. Trois fois par semaine, le percolat, récupéré dans la cuvette du bas, est reversé dans la cuvette du haut ou le niveau est réajusté avec de l'eau déminéralisée.

4 - **MESURES ET ANALYSES**

Les observations et les mesures à réaliser sont :

4.1 - En cours de végétation

- des mesures de hauteur : réalisées trois fois par semaine, du sol au point d'insertion sur la tige de la dernière feuille entièrement dégainée ;

- des comptages des feuilles entièrement dégainées trois fois par semaine ;

- des observations qualitatives (carences ...).

4.2 - A la récolte

- les observations et mesures précédentes ;

- la mesure de la hauteur totale, du sol au bout de la feuille redressée verticalement la plus haute.

4.3 - Après la récolte

- la détermination, du poids de matière sèche des parties aériennes des plants ;

- la mesure du pH-eau et KCl de la terre de chaque parcelle ;

- la détermination, sur les échantillons moyens de terre de chaque traitement (12) des taux de matière organique, bases échangeables, capacité d'échange cationique, phosphore assimilable, azote et bases totales ;

- la détermination, sur les percolats de chaque parcelle (72), des pH et sur les percolats de chaque traitement (12), des teneurs en N, P, K, Ca, Mg, S et de la résistivité ;

- la détermination, sur les échantillons moyens de chaque traitement, des teneurs des plants en N, P, K, Ca, Mg, Na, Cendres, SiO_2 , Fe, Al, Cu, Mn, Ni, Cr et Co pour en déduire les immobilisations.

Annexe 1 : Tableau

PRODUIT	conc. g/l	mg/kg terre	Quantité d'éléments fournis (mg/kg de terre sèche)								Nbre Apports	Volume/pot/ fractionnement (ml)	
			N	K	S	B	Cu	Mo	Zn	Mg			
NH ₄ NO ₃	132	291	102									3	5
K NO ₃	80	176	24	68								3	5
H ₃ BO ₃	5,40	4					,699					2	2,5
Cu SO ₄ , 5H ₂ O	8,60	6,30			,804			1,593				2	2,5
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ , 15 H ₂ O	,40	,30	,023						,18			2	2,5
Zn SO ₄ , 7H ₂ O	6,50	4,80			,535					1,092		2	2,5
Mg SO ₄ , 7H ₂ O	56	41,2			5,35						4,06	1	5
Qté d'élts apportés mg/kg terre			126	68	6,69	,699	1,593	,18	1,092	4,06	-	-	
Unités fertilisantes kg/ha			382	352	6,69	2,10	4,80	,50	3,30	20	-	-	

INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE SILICE COMBINEES A DES DOSES CROISSANTES DE PHOSPHORE : ETUDE EN VASE DE VEGETATION

I - OBJECTIF

Une première expérience conduite en serre a montré que, sur ces sols, la croissance du maïs, utilisé comme plante-test, s'amplifiait avec l'augmentation des doses de phosphate apportées. La limite des apports de P_2O_5 se situerait aux alentours de 5 T/ha de P_2O_5 ; au-delà, des problèmes de croissance ont pu être observés.

Une manipulation, portant sur un petit nombre de pots, nous a permis d'observer, qu'à dose égale de phosphore, un sol ayant reçu entre 10 et 50 T/ha de scorie provenant du traitement du nickel, permettait une meilleure croissance de la plante ainsi que l'absence de symptôme de carence phosphatée.

L'objectif de cette étude est donc :

- d'une part de savoir si la différence de croissance entre les différentes doses de scorie est significative,
- d'autre part de déterminer quelle est la dose maximale de scorie en fonction des doses de P_2O_5 à apporter et d'en observer si possible les effets secondaires.

II - EXPERIMENTATION

1 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'essai est disposé en blocs factoriels complets et équilibrés comprenant 5 répétitions (indiquées k).

Deux facteurs sont étudiés :

* le phosphore, indicé i :

i = 1	1,5 T/ha de P_2O_5 ,
i = 2	3 T/ha de P_2O_5 ,
i = 3	4,5 T/ha de P_2O_5 .

* la scorie, indicée j :

j = 1	8 T/ha,
j = 2	16 T/ha,
j = 3	24 T/ha,
j = 4	32 T/ha,
j = 5	40 T/ha.

Chaque parcelle élémentaire comporte 2 pots, dits de sécurité, indicés l.

Les parcelles sont disposées de façon aléatoire grâce au logiciel STATITCF.

Au total l'essai regroupe 150 pots = 5 répétitions x 5 doses de scorie x 3 doses de phosphore x 2 pots.

2 - AMENDEMENTS ET FUMURES

2.1 - Amendement calcique

Chaque pot recevra l'équivalent de 2,1 T/ha de CaO de façon à relever le pH du sol et à prévenir le déséquilibre calco-magnésien qui peut être engendré par la forte teneur en magnésie contenue dans la scorie (36 %).

2.2 - Amendement phosphaté

Le phosphore est apporté sous forme de superphosphate triple titrant 44,45 % de P₂O₅.

Les quantités à apporter sont les suivantes (hypothèse 3000 T/ha de terre) :

Dose	Unité fertilisante	mg d'engrais/kg de terre	mg/pot
1	1500	1125	7650
2	3000	2250	15300
3	4500	3375	22950

2.3 - L'apport de scorie

La scorie est utilisée pour sa forte teneur en SiO₂ (55 %). Elle provient du traitement du nickel (SLN Nouméa).

Dose	Quantité apportée en T/ha	mg scorie/kg de terre	g scorie/pot
1	8	2667	18,1
2	16	5333	36,3
3	24	8000	54,4
4	32	10667	72,5
5	40	13333	90,7

2.4 - La fumure complète

Elle est calculée à partir des immobilisations en azote et en potasse, dans les tiges, feuilles et grains au 164ème jour de végétation au champ. Les éléments nécessaires à chaque plante sont apportés par la solution nutritive sans tenir compte des mêmes éléments déjà présents dans le sol pour être certain qu'ils ne soient pas limitants.

Le tableau ci-joint (voir annexe 1) détaille la composition de la solution nutritive et son fractionnement. Les apports d'azote et de potasse sont réalisés au semis, au 11ème et au 18ème jours. Les oligoéléments et le magnésium sont apportés au semis et au 11ème jour.

La concentration de la solution nutritive ne dépasse pas la valeur maximale de 20 milliéquivalents.

Les calculs de la fumure complète sont faits sur la base de 6,8 kg de terre sèche par pot.

III - CONDITIONS D'EXPERIMENTATION

Les vases de végétation utilisés sont ceux mis au point par le Laboratoire d'Agronomie du Centre ORSTOM de Nouméa.

La durée de l'expérimentation est fixée à 28 jours. Au-delà, des distorsions interviennent entre la croissance du plant en serre et au champ.

Les graines de maïs, après calibrage, sont placées en armoire de germination 48 heures avant le repiquage qui a lieu en fin d'après-midi.

Trois fois par semaine, le percolat se trouvant dans la cuvette de réception est reversé dans la cuvette d'irrigation où le niveau est réajusté avec de l'eau permutée.

IV - MESURES ET ANALYSES

1) En cours de végétation sont réalisés :

- des mesures de hauteur : 3 fois par semaine, du sol au point d'insertion sur la tige de la dernière feuille entièrement dégainée,

- le comptage des feuilles entièrement dégainées 3 fois par semaine,

- des observations qualitatives (carences, déséquilibres ...),

- la mesure de la consommation en eau de la plante par pesée de la solution avant réajustement.

2) A la récolte sont effectuées :

- les observations et mesures précédentes,
- la mesure de hauteur totale, du sol au bout de la feuille redressée verticalement la plus haute.

3) Après la récolte, on procède à :

- la détermination du poids de matière sèche de chaque plant,

- la mesure du pH des terres de chaque pot ainsi qu'une analyse complète sur des échantillons moyens,

- la mesure du pH des percolats des 75 parcelles ainsi qu'une analyse des eaux portant sur les 15 traitements moyens,

- la détermination des teneurs en minéraux des parties aériennes des végétaux (Cendres, SiO_2 , N, P, Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Ni, Cr, Co).

