

INSTITUT DES SCIENCES AGRONOMIQUES DU BURUNDI

I. S. A. BU.



Division de l'Aménagement du Milieu

Note technique

Effets stimulants et toxiques de l'Aluminium sur la
croissance des plantes cultivées dans les sols humifères
acides du Burundi

Luc OPDECAMP

Innocent MUSONI

Jacques GOURDIN

RESUME

Une séquence de sols humifères d'acidité croissante a été utilisée en vases de végétation, pour étudier la sensibilité d'espèces vivrières et fourragères, ainsi que celle du thé, à la concentration en aluminium échangeable du sol. Des effets stimulants à basse concentration en aluminium ont été mis en évidence, qui sont relayés par des effets toxiques à des concentrations plus élevées. Toutefois, chez le théier, les effets stimulants semblent se maintenir à haute concentration. La stimulation de la croissance a été attribuée à l'absorption de complexes Al-P, en équilibre dans le sol avec une phase hydroxy-alumino-phosphatée amorphe. Des seuils critiques et optima d'aluminium ont été calculés sur base des résultats expérimentaux. Lorsque l'aluminium sature à plus de 60% le complexe adsorbant du sol, un effet toxique assez grave est diagnostiqué pour la plupart des espèces. On a qualifié d'allic les sols où ce seuil est dépassé. Il est apparu que la tolérance à de hautes concentrations en aluminium se manifestait essentiellement de manière interspécifique. Expérimentalement, aucune toxicité manganique n'a été diagnostiquée.

SUMMARY

Pot trials have been conducted with humiferous soils of increasing acidity, in order to study the sensitivity of food-, forage crops and tea to the concentration of exchangeable aluminium in the soil. For food and forage crops, stimulative effects occurred at low aluminium concentrations, while toxic effects were detected at higher concentrations. Tea growth, however, was stimulated even at high aluminium concentrations. The stimulative effects are attributed to the absorption of Al-P complexes, which are in equilibrium, in the soil, with an amorphous hydroxy-alumino-phosphated phase. Critical and optimal levels of aluminium concentration have also been calculated on the basis of experimental data. At more than 60% aluminium saturation of the exchange complex, a toxic effect is reducing the growth of most species. Therefore, it is suggested to speak of allic soils for soils in which this level is exceeded. It has appeared that aluminium tolerance is essentially an interspecific feature. No manganese toxicity has been observed experimentally.

INTRODUCTION

La plupart des sols d'altitude du Burundi sont de nature ferrallitique et développent des pH acides, inférieurs à 6. Dans les régions agro-pastorales comme le Bututsi ou le Mugamba Sud, les sols sont souvent profondément imprégnés de matière organique humifiée. Lorsque les teneurs en carbone organique dépassent 20 kg/m³, les sols ferrallitiques se rangent dans les "Kaolisols Humifères" de la classification régionale (TAVERNIER et SYS, 1965) ou dans les "Humox" de la "Soil Taxonomy" (SOIL SURVEY STAFF, 1975).

Au cours de l'acidification des sols, des formes cationiques de l'aluminium s'individualisent en concentration croissante sur le complexe adsorbant, déplaçant les bases échangeables qui sont alors lessivées. Les plus fortes concentrations en aluminium échangeable sont mesurées dans les pâturages à Eragrostis, bordant les terres cultivées pour les vivres (OPDECAMP, 1988). De nombreuses espèces cultivées sont sensibles à l'aluminium, qui peut réduire ou bloquer leur croissance par toxicité physiologique.

SCHULTZE-KRAFT et GIACOMETTI (1978) ont dressé un inventaire des ressources fourragères plus ou moins tolérantes à l'acidité. RHUE (1979) a effectué une synthèse bibliographique sur le contrôle génétique de la tolérance à l'aluminium chez les céréales. ABRUNA-RODRIGUEZ et al. (1982) ont établi la sensibilité différentielle des plantes tropicales à tubercules aux facteurs d'acidité du sol. Notre étude s'attache à préciser l'incidence de concentrations croissantes en aluminium sur la croissance d'espèces et cultivars vivriers et fourragers cultivés au Burundi, en utilisant des sols humifères acides représentatifs des régions agro-pastorales d'altitude. Il s'agit d'affiner les connaissances scientifiques sur la dégradation de la fertilité des sols en milieu acide, et de prospecter la tolérance génétique du matériel végétal.

MATERIAUX ET METHODES

La démarche expérimentale procède d'une approche pédo-physiologique intégrée, en analysant le fonctionnement d'un système "sol-plante". L'idéal serait de pouvoir établir la sensibilité d'une plante à l'aluminium par le rendement d'une récolte, ce qui impliquerait de travailler en plein champ. Outre l'espace imposant que cela nécessiterait (plusieurs espèces, plusieurs cultivars, plusieurs sols), on se heurterait également à l'hétérogénéité du sol dans un même champ, nécessitant un nombre important de répétitions. On a dès lors utilisé un dispositif en vases de végétation, constitué d'une série d'échantillons homogènes de sols, présentant des concentrations variables en aluminium échangeable, sur lesquels on mesure la croissance du matériel végétal.

Caractérisation des échantillons de sols

Les échantillons de sols ont été prélevés à la surface (0-15 cm) de champs de la station ISABU de GISOZI, à 2000 m d'altitude. Ils sont constitués de masses d'environ 500 kg de terre, homogénéisées, et sous-échantillonnées en 4 composites de 100 prises (quelques grammes par prise) pour caractérisation analytique. Ces échantillons sont sélectionnés en fonction de la gamme de pH et de concentration relative en aluminium échangeable qu'ils présentent; ainsi que de caractéristiques texturales plus ou moins constantes. Ils appartiennent tous à des "Ferralsols humifères", avec ou sans horizon sombre (classification régionale), c'est-à-dire à des "Sombrihumox" ou "Haplohumox" (Soil Taxonomy). La composition minéralogique de ces sols a été étudiée par OPDECAMP (1988); elle est dominée par la kaolinite, la gibbsite et une pseudo-chlorite aluminique; de plus on a dosé des quantités significatives de fer et d'aluminium amorphes, ce dernier étant constitué d'hydroxy-polymères.

Le tableau I fournit les résultats de l'analyse granulométrique des dix échantillons de sol retenus pour conduire l'expérimentation.

Tableau I. Résultats de l'analyse granulométrique des échantillons de sol utilisés en vases de végétation.

Echant. vases	Echantillons Nos Labo	Granulométrie		
		% argile	% limon	% sable
BG1	G538-41	58.5	8.4	33.1
BG2	G188-91	53.4	7.3	39.3
BG3	G534-37	64.5	9.7	25.8
BG4	G192-95	56.0	8.3	35.7
BG5	G306-09	62.7	9.6	27.7
BG6	G180-83	68.6	9.9	21.5
BG7	G310-13	54.0	6.2	39.8
BG8	G196-99	61.1	7.7	31.2
BG9	G550-53	65.6	9.4	25.0
BG10	G204-07	66.7	8.2	25.1

Ce sont des matériaux argileux, dosant environ 60% d'argile, 10% de limon et 30% de sable.

Au tableau II, sont reproduits les caractéristiques analytiques relatives au pH (rapport 1/5), à la conductivité électrique (CE, rapport 1/5), à la matière organique (%C, %N, C/N) et à la capacité d'échange cationique effective (ECEC = somme des cations échangeables, voir tableau III). On y observe que du sol le moins acide au plus acide, le pH (H₂O) décroît d'une bonne unité (de 5.6 à 4.4), le rapport C/N de la matière organique augmente de 2-3 unités (de 11-12 à 14-15), et l'ECEC chute de 8 à 4 méq/100 gr. L'évolution de l'ECEC rend compte d'une perte de charges variables qu'on localise généralement sur la matière organique. Toutefois, il faut signaler que des charges négatives pH dépendantes peuvent aussi être localisées sur la pseudo-chlorite aluminique, si l'on se réfère aux auteurs cités par BRUGGENWERT

et KAMPHORST (1979); HSU et RICH (1960); RICH (1960); DIXON et JACKSON (1962); SHEN et RICH (1962); COLEMAN et THOMAS (1964); MC LEAN et al. (1964).

D'autre part, on remarque la richesse en carbone de ces sols humifères, dont la teneur oscille autour de 4-5% en surface, et qui ne subit pas d'évolution particulière en fonction du pH.

Tableau II. pH, conductivité électrique (CE), teneurs en carbone et azote, et ECEC des échantillons utilisés en vases de végétation. Valeurs moyennes sur les 4 échantillons composites.

Echant. vases	pH		CE mmho/cm	Matière organique			ECEC méq/100 gr
	H ₂ O	KCl		%C	%N	C/N	
BG1	5.6	4.6	0.064	3.49	0.29	12.0	7.59
BG2	5.4	4.5	0.085	3.73	0.32	11.7	7.08
BG3	5.3	4.4	0.079	5.02	0.41	12.2	6.80
BG4	5.0	4.2	0.078	4.56	0.40	11.4	6.26
BG5	4.7	4.2	0.082	5.13	0.40	12.8	4.41
BG6	4.7	4.2	0.101	4.85	0.38	12.8	4.47
BG7	4.4	4.1	0.104	4.53	0.32	14.2	4.48
BG8	4.5	4.1	0.070	4.55	0.35	13.0	4.50
BG9	4.8	4.3	0.046	4.93	0.38	13.0	3.73
BG10	4.4	4.1	0.050	4.65	0.30	15.5	3.99

Le tableau III reproduit la composition cationique du complexe adsorbant des échantillons de sol utilisés. A partir de celle-ci, on peut calculer la concentration relative de l'aluminium en phase de surface, par l'indice "m" de KAMPRATH:

$$m = 100 \times \text{Al}/\text{ECEC}$$

Tableau III. Composition en cations échangeables du complexe adsorbant des échantillons utilisés en vases de végétation. Valeurs moyennes sur les 4 échantillons composites.

Echant. vases	Cations échangeables en méq/100 gr.						m %
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺	
BG1	4.71	1.53	1.00	0.03	0.23	0.09	3
BG2	4.64	1.12	0.83	0.01	0.41	0.07	6
BG3	3.31	1.04	1.02	0.10	1.13	0.20	17
BG4	3.32	0.59	0.55	0.01	1.70	0.09	27
BG5	0.91	0.19	0.60	0.04	2.39	0.28	54
BG6	0.75	0.65	0.30	0.02	2.67	0.08	60
BG7	0.50	0.21	0.20	0.05	3.18	0.34	71
BG8	0.58	0.09	0.11	0.01	3.57	0.14	79
BG9	0.31	0.05	0.09	0.06	3.16	0.06	85
BG10	0.11	0.04	0.15	0.01	3.53	0.15	88

La concentration relative en aluminium échangeable varie de 3 à 88%, tandis que sa concentration absolue varie de 0.2 à 3.6 méq/100 gr. L'évolution est plus ou moins régulière de "BG1" à "BG10", si l'on excepte l'accroissement rapide entre "BG4" et "BG5". L'évolution des bases échangeables (Ca, Mg, K, Na) est en sens inverse de celle de l'aluminium, ce qui est strictement logique puisqu'elles sont déplacées par ce cation à mesure que l'acidification progresse.

Leur lessivage s'opèrerait dans le profil principalement sous formes de bicarbonates et de nitrates (produits par la respiration et la nitrification).

Le tableau IV reproduit les teneurs en phosphore et en manganèse des échantillons de sol. Deux dosages du phosphore ont été effectués, le premier par la méthode Olsen-Dabin (extraction $\text{NaHCO}_3\text{-NH}_4\text{F}$), noté "P o-d", le second par extraction "totale" ($\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4$), noté "P t". Le manganèse a été dosé pour vérifier si une toxicité manganique était associée à la toxicité aluminique, comme on le suspecte souvent en conditions acides. On a dosé ses formes "hydrosoluble", "échangeable" et "réductible" (au chlorhydrate d'hydroxylamine), dont la somme donne le manganèse "actif" (PELLOUX, 1983).

Tableau IV: Phosphore "Olsen-Dabin", phosphore "total", et formes du manganèse dans les échantillons utilisés en vases de végétation. Valeurs moyennes sur les 4 échantillons composites.

Echant. vases	P o-d ppm	P t ppm	Mn (még/100 gr.)			
			hydrosoluble	échangeable	réductible	actif
B61	56	1139	0.00	0.02	0.18	0.20
B62	96	1466	0.00	0.03	0.27	0.30
B63	133	1215	0.00	0.04	0.43	0.47
B64	230	1643	0.01	0.04	0.44	0.49
B65	178	1435	0.01	0.03	0.31	0.35
B66	103	1058	0.01	0.02	0.13	0.16
B67	55	899	0.02	0.02	0.05	0.09
B68	106	1095	0.01	0.03	0.11	0.14
B69	74	973	0.01	0.03	0.12	0.16
B610	79	873	0.01	0.01	0.04	0.06

L'évolution du phosphore en fonction de la concentration relative en aluminium échangeable est reproduite à la figure 1, qui mérite quelques commentaires. Les courbes du phosphore Olsen-Dabin et du phosphore total sont d'allure similaire. Le comportement du phosphore dans ces échantillons est analogue à celui qui a été observé par ROBARGE et COREY (1979) avec une résine échangeuse d'ions, saturée en aluminium, progressivement neutralisée par une base. Ces auteurs ont mis en évidence un pH d'affinité maximum pour le phosphore. A mesure que leur résine-Al est neutralisée par du NaOH ou du Ca(OH)_2 , ils suggèrent que l'hydroxy-polymérisation progressive de l'aluminium détermine une capacité croissante de rétention du phosphore, jusqu'à un pH tel qu'une compétition s'engage entre les anions hydroxyls et le phosphore, réduisant alors la rétention de ce dernier (phase décroissante). L'aluminium et le fer amorphes présents dans nos échantillons pourraient donc expliquer l'évolution constatée à la figure 1. L'allure de la courbe du phosphore "total" suggère de plus que le phosphore pourrait participer à la structure intime des constituants aluminiques et ferriques des sols utilisés.

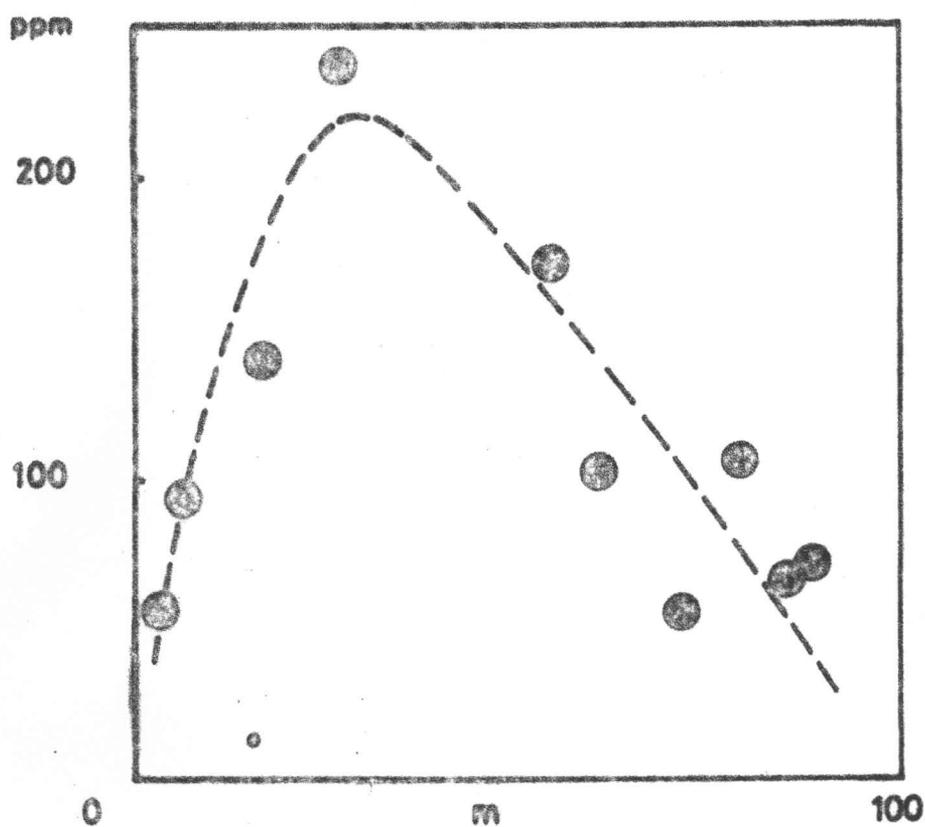
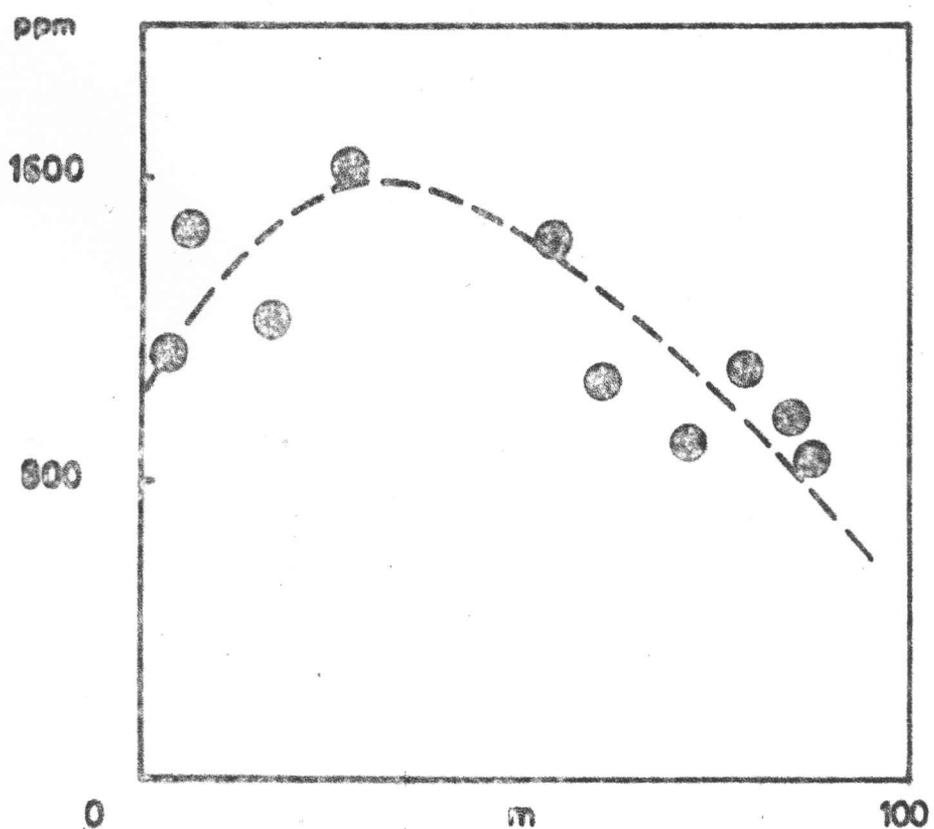
$P(\text{NaHCO}_3 - \text{NH}_4\text{F})$

 $P(\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{SO}_4)$


Fig. 1 : Evolution du phosphore (extraction $\text{NaHCO}_3 - \text{NH}_4\text{F}$ et $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{SO}_4$) selon la concentration relative en aluminium échangeable (m) dans les échantillons des sols humifères acides

Quant à l'évolution du manganèse, elle situerait les risques de toxicité en cet élément bien avant que la concentration en aluminium n'atteigne son maximum. La concentration la plus forte en manganèse est obtenue pour une saturation aluminique effective de seulement 27% (BG4).

Matériel végétal utilisé

Le matériel végétal utilisé est constitué d'espèces et cultivars vivriers et fourragers actuellement ou prochainement diffusés au Burundi. Les quatre principales espèces de céréales ont d'abord été retenues: maïs, sorgho, blé et triticales. Pour le maïs, les trois cultivars suivants ont été utilisés: le "PHA" (Pool de Haute Altitude), formé d'une population de cultivars locaux; le "POOL-9", du CIMMYT; et l'"IGARAMA-4", sélectionné pour les régions de moyenne altitude par l'ISABU. Les cultivars "GAMBELLA" (basse altitude), "BM-27" et "SVR-157" ont été choisis pour le sorgho. Pour le blé, essentiellement cultivé en haute altitude, trois cultivars ont également été choisis: le "ROMANY", diffusé depuis plusieurs années; le "COWBIRD", destiné à remplacer le ROMANY devenu sensible à la rouille; et un cultivar sélectionné pour sa tolérance à l'aluminium, le "ALDAN S-PF70354". Enfin, deux cultivars de triticales, céréale résultant du croisement entre le blé et le seigle: "MIZAR" et "BVR-Arm".

Trois légumineuses vivrières ont été retenues: le haricot, avec deux cultivars, le "HM 5-1" et le "DORE DE KIRUNDO"; le pois, cultivar NI 43; et l'arachide, cultivar G18.

Une dernière espèce vivrière, constituée par la pomme de terre, a été soumise aussi à l'étude, avec deux cultivars: "MUZIRANZARA" et "NDINAMAGARA".

Ensuite, les légumineuses fourragères suivantes ont été choisies: Lupinus luteus (lupin jaune); Vicia sativa (vesce); Mucuna pruriens (cultivar "UTILIS NOIR 85); et Desmodium intortum.

La sensibilité d'une seule graminée fourragère a pu être étudiée: Panicum maximum (cultivar T 58).

Enfin, une tentative d'expérimentation avec le théier a également été effectuée.

Procédure expérimentale

La procédure expérimentale s'appuie sur un dispositif en vases de végétation, contenant les dix échantillons de sols (BG1 à BG10) caractérisés aux tableaux I à IV. Quatre vases, d'un volume de 5 dm³ chacun, sont remplis avec chaque échantillon de sol. Le dispositif comprend donc 40 vases en tout (10 objets en 4 répétitions).

L'expérimentation est menée sous abri de tôles PVC translucides, en deux sites distincts: à Gisozi (2000 m d'altitude) ou à Bujumbura (900 m d'altitude),

suyvant l'espèce ou le cultivar utilisé.

Chaque type de matériel végétal est semé, à raison de plusieurs graines par vase. Un démarrage est effectué peu après la levée. Le nombre de plants par vase est variable selon les espèces: de 2 à 15.

Des arrosages réguliers sont réalisés avec de l'eau déminéralisée à Bujumbura, avec de l'eau de source à Gisozi, dont les caractéristiques analytiques figurent au tableau V.

Tableau V. Principales caractéristiques analytiques des eaux d'arrosage utilisées pour les vases de végétation.

Caractéristique	Eau déminéralisée à Bujumbura	Eau de source à Gisozi
pH	5.8	6.8
CE (mmho/cm)	0.001	0.027
Na ⁺ (méq/l)	0.01	0.01
Ca ²⁺ (méq/l)	0.01	0.02
Mg ²⁺ (méq/l)	0.01	0.03
K ⁺ (méq/l)	0.01	0.00
CO ₃ ²⁻ (méq/l)	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻ (méq/l)	0.05	0.22

L'eau d'arrosage de Gisozi est légèrement bicarbonatée, mais reste extrêmement pauvre en sels. Il s'agit de l'eau qui est distribuée dans la station ISABU.

La période expérimentale de croissance est en moyenne de 1 mois à Bujumbura et de 2 mois à Gisozi (températures plus basses). Pour le théier, la période s'est prolongée jusqu'à 8 mois, du fait d'une levée très lente.

Les biomasses aériennes sont récoltées, séchées et pesées avec une précision de l'ordre du 1/10e de mgr. Les résultats sont calculés en mgr/plant pour chaque vase, en divisant la biomasse sèche totale produite dans chaque vase par le nombre de plants utilisés.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats expérimentaux complets obtenus en vases de végétation sont reproduits dans les tableaux 1 à 23 de l'annexe. Les biomasses aériennes relatives qui y sont renseignées sont obtenues en posant conventionnellement la biomasse moyenne maximum (calculée sur les 4 répétitions) égale à la valeur de 97.5 %.

Les coefficients de variation calculés sur les 4 répétitions varient autour de 20% en moyenne. Ils peuvent cependant descendre sous les 10%, de même qu'approcher parfois les 50%. Pour le théier, les coefficients de variation sont plus élevés, pénalisant la précision des résultats (voir tableau 23 de l'annexe).

Allures générales des sensibilités de croissance à la concentration relative en aluminium échangeable

On peut exprimer graphiquement la croissance des espèces et cultivars considérés en fonction de la concentration relative en aluminium échangeable. On porte en ordonnée la biomasse aérienne relative qui a été produite, et en abscisse la valeur de "m" de l'échantillon de sol correspondant.

La figure 2 reproduit les graphiques obtenus avec les diverses céréales utilisées. Les courbes tracées en pointillé décrivent l'allure générale de la sensibilité du matériel végétal à la concentration en aluminium. On observe des courbes de profil identique, de type parabolique, quel que soit le cultivar ou l'espèce considérés. Une stimulation de la croissance est diagnostiquée lorsque la concentration augmente jusqu'à un seuil optimum, au-delà duquel, alors, la croissance est progressivement et plus ou moins rapidement inhibée. On diagnostique donc à haute concentration relative en aluminium échangeable un phénomène de type "toxicité", mais aussi, à faible concentration en cet élément, un effet "stimulant" sur la croissance. L'effet stimulant de l'aluminium à petites doses a été observé sur plusieurs cultures par de nombreux auteurs, tels que BERTRAND et AGULHON (1912), CERIGHELLI (1955), HACKETT (1962), Mc LEOD et JACKSON (1965), cités par SEGALIN (1973).

Les figures 3 et 4 reproduisent des graphiques analogues pour le reste du matériel végétal utilisé: légumineuses vivrières, pomme de terre et espèces fourragères.

Les courbes de sensibilité présentent la même allure générale que celle des céréales, sauf pour la vesce où l'on ne détecte pas d'optimum. On constate que certaines espèces ou cultivars réagissent de manière moins prononcée que d'autres à des variations naturelles de concentration en aluminium, laissant supposer une moindre dépendance physiologique. Les différences de "plasticité" du matériel végétal apparaissent surtout de manière interspécifique plutôt qu'intraspécifique. Elles pourraient être partiellement attribuées à la taille spécifique des graines, qui conditionne la nutrition autonome des jeunes plants pendant une période plus au moins prolongée. La moindre sensibilité expérimentale d'espèces comme le haricot, l'arachide, la pomme de terre, le mucuna, voire même le pois ou le maïs, pourrait être liée à la taille élevée de leur semences, rendant les plantules moins sensibles aux conditions expérimentales appliquées. On notera toutefois la bonne plasticité du lupin, alors que ses semences restent de taille assez modeste.

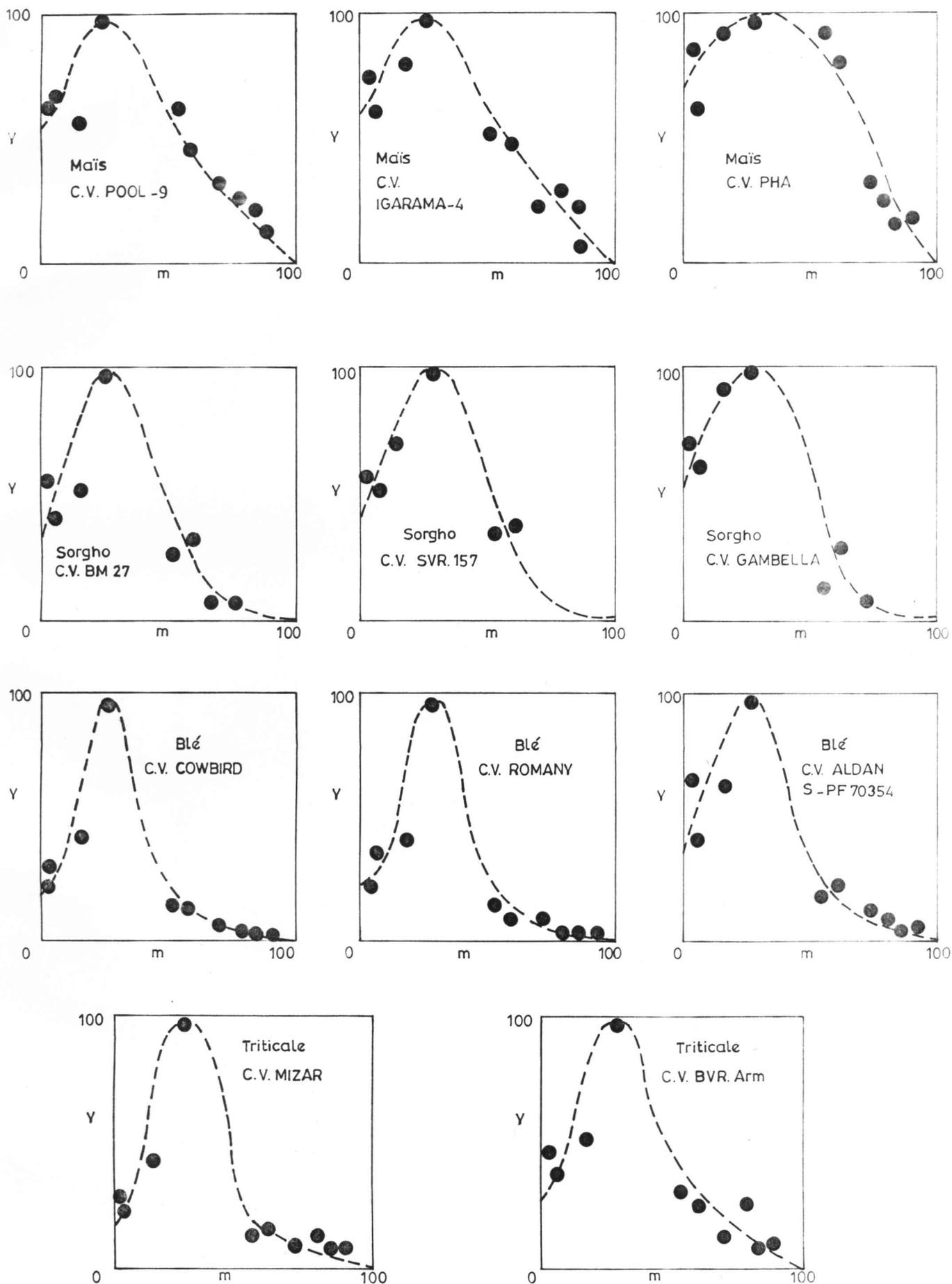


Fig.2 :Sensibilité relative de la croissance des céréales à la concentration relative en aluminium échangeable(m) des sols humifères acides. Y=Biomasse aérienne relative (%)

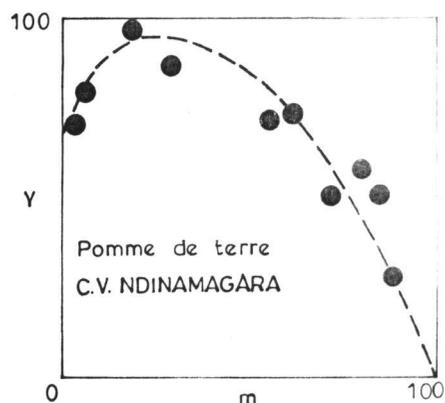
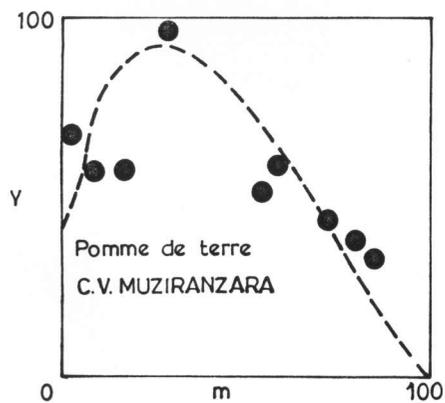
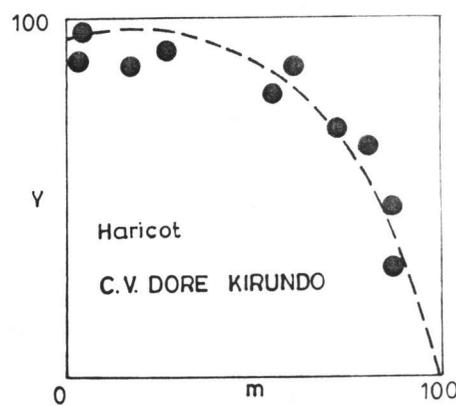
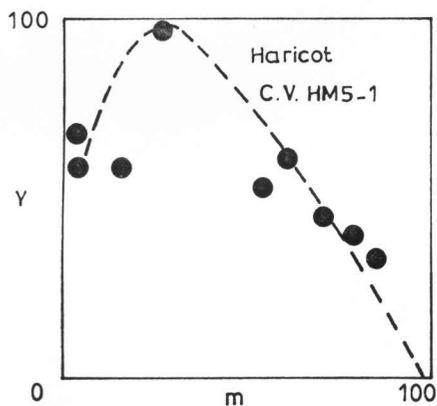
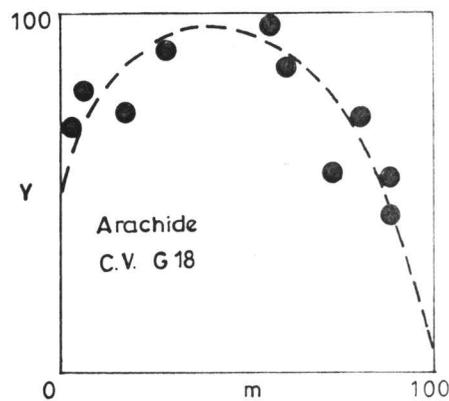
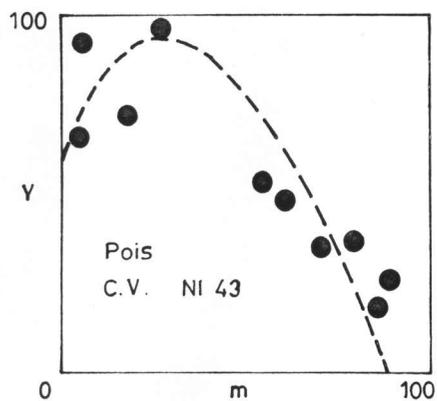


Fig. 3 : Sensibilité relative de la croissance des légumineuses vivrières et de la pomme de terre à la concentration relative en aluminium échangeable(m) des sols humifères acides . Y= Biomasse relative (%)

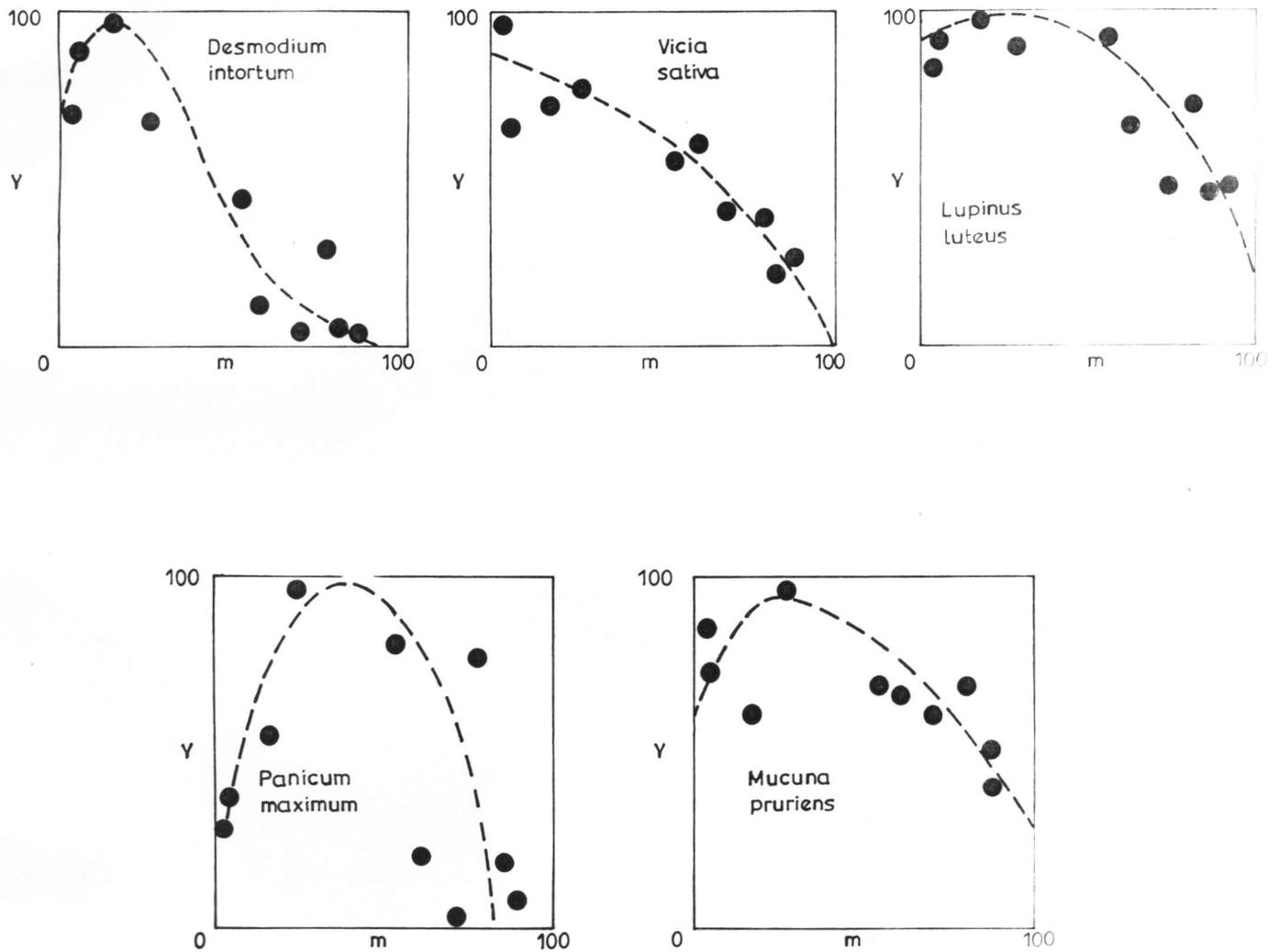


Fig.4 :Sensibilité relative de la croissance d'espèces fourragères à la concentration en aluminium échangeable (m) des sols humifères acides
 Y = Biomasse aérienne relative (%)

En ce qui concerne le diagnostic d'une éventuelle toxicité manganique, l'allure des courbes expérimentales obtenues montre une croissance optimum aux concentrations les plus fortes en manganèse, correspondant à des valeurs de "m" de l'ordre de 20-30. L'inhibition de la croissance végétale, aux plus fortes concentrations en aluminium, va de pair avec une réduction des concentrations en manganèse. Aucune toxicité manganique n'est donc diagnostiquée dans les sols humifères acides utilisés.

Discussion de l'allure générale des courbes de sensibilité à l'aluminium

L'allure générale de la sensibilité du théier n'a pas été reproduite, du fait que les résultats expérimentaux sont entâchés de coefficients de variation assez élevés (tableau 23 de l'annexe).

Les résultats du théier confirment cependant la meilleure croissance de cette espèce sur les sols les plus acides, aux concentrations les plus élevées en aluminium échangeable. Il semble, chez cette espèce, que l'effet stimulant de l'aluminium, diagnostiqué à faible concentration chez les autres espèces considérées, se prolonge à haute concentration, sans qu'aucun phénomène de phyto-toxicité n'apparaisse.

L'effet stimulant de l'aluminium sur la croissance du théier a été démontrée initialement par CHENERY (1955), cité par KONISHI et al. (1985). SIVASUBRAMANIAM et TALIBUDEEN (1971) suggèrent que cette espèce neutralise l'activité de l'aluminium par complexation avec des acides organiques et des flavonols, au niveau des cellules foliaires. Ces réactions de complexation permettent l'accumulation de l'aluminium dans les feuilles du théier, sans apparemment occasionner des phénomènes de toxicité. Les mêmes auteurs mesurent une corrélation très hautement significative entre l'absorption de l'aluminium et du phosphore. Ils suggèrent que le phosphore et l'aluminium sont absorbés sous forme d'un complexe moléculaire Al-P, avec un rapport Al/P de 1, et dont la charge serait faible à nulle.

L'existence de complexes Al-P solubles est confirmée par les travaux de DI PASCALE et VIOLANTE (1986), réalisés dans des suspensions OH-Al. Ces complexes seraient en équilibre avec la phase amorphe polyhydroxy-alumino-phosphatée, détectée dans les échantillons de sols utilisés à la figure 1. La phase amorphe solide Al-P a été assimilée par certains auteurs à une pseudo-variscite amorphe, répondant à la formule " $Al(OH)_2H_2PO_4$ ", et de produit de solubilité $pK_{so} = 28$ (VEITH et SPOSITO, 1977; TRAINA et al., 1986), plus élevé donc que celui de la variscite ($pK_{so} = 30$).

KONISHI et al. (1985) suggèrent également un effet régulateur de l'aluminium sur l'absorption du phosphore chez le théier.

Ces observations expérimentales nous semblent extrêmement importantes, car

elles signifieraient que la nutrition phosphorée en milieu acide serait stimulée par la présence d'aluminium, par formation de complexes moléculaires Al-P en solution du sol. Plus le sol contiendrait d'aluminium, plus le théier pourrait absorber du phosphore, expliquant ainsi sa meilleure croissance dans les sols les plus acides. Les teneurs en phosphore Olsen-Dabin mesurées dans les échantillons de sols les plus acides de l'expérimentation, de l'ordre de 70 ppm, seraient donc encore bien au-dessus des niveaux de carence. Il y a lieu aussi de s'interroger, dans ces conditions, sur la signification du dosage du phosphore dans les sols acides avec les techniques habituelles.

Pour d'autres espèces, comme par exemple le blé, certains auteurs ne détectent pas d'effet stimulant de l'aluminium sur l'absorption du phosphore, tels que TANG et al. (1983), cités par DABIN (1987). Ce dernier auteur détecte cependant une stimulation de l'absorption du phosphore chez le blé en présence de faibles concentrations en aluminium (en solution de culture).

Nous suggérons dès lors que les effets stimulants de l'aluminium observés sur le matériel végétal expérimenté (figures 2 à 4), sont causés par une stimulation de la nutrition phosphorée via l'absorption de complexes Al-P solubles en équilibre avec une phase amorphe polyhydroxy-alumino-phosphatée. Ces effets stimulants sont limités, pour de nombreuses espèces, par une activité croissante de l'aluminium dans la suspension cytoplasmique, entraînant une altération des réactions biochimiques où le phosphore est impliqué. Chez le théier, l'activité de l'aluminium est neutralisée par complexation avec des acides organiques et des flavonols, permettant un effet stimulant prolongé aux concentrations plus élevées.

Seuils optima et critiques de l'aluminium

On peut calculer les seuils optima et critiques d'aluminium échangeable, à partir des résultats expérimentaux obtenus. Le seuil optimum correspond à la concentration relative en aluminium échangeable pour laquelle la croissance est maximum. Le seuil critique précise quant à lui la concentration en aluminium qui provoque des effets toxiques réduisant la croissance de plus de 50% du maximum expérimental.

Les calculs sont effectués en assimilant les courbes expérimentales de sensibilité à des fonctions paraboliques. Ces fonctions sont estimées par régression multiple: $Y = ax^2 + bx + c$, en posant Y égal à la biomasse produite et x égal à "m". Pour chaque matériel végétal, on dispose, en général, de 40 valeurs expérimentales de biomasse et de 10 valeurs de "m" (4 répétitions). La régression multiple est effectuée sur IBM-PC, avec le module de régression linéaire du logiciel STAT-ITCF (Service des Etudes Statistiques de l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages, Maisse, France). L'annulation de la

dérivée première de la fonction permet le calcul du seuil optimum, correspondant à Y_{max} . Le calcul du seuil critique s'effectue en posant $Y_{max}/2 = ax^2 + bx + c$.

Ces calculs ne sont pas effectués pour le théier, et ne produisent pas de seuils cohérents pour le Desmodium intortum. Ceci est attribué aux coefficients de variation trop élevés enregistrés sur les sols les plus acides pour cette espèce (voir tableau 21 de l'annexe). Pour le reste du matériel végétal, les résultats sont présentés au tableau VI.

Les coefficients de corrélation multiple varient entre 0.5 et 0.9 suivant le matériel considéré, ce qui implique une détermination très variable, parfois peu satisfaisante ($R^2 < 0.5$). L'estimation des courbes de sensibilité par des paraboles est donc parfois assez imprécise, et les seuils calculés qui en résultent ne doivent donc pas toujours être pris à la lettre. D'autre part, on peut suspecter que ces seuils dépendent aussi de la nature du complexe organo-minéral du sol, et qu'ils puissent dès lors varier géographiquement.

Tableau VI. Seuils optima (mo) et critiques (mx) de la concentration relative en aluminium échangeable des sols humifères acides utilisés, pour la croissance du matériel végétal testé.
Coefficients de corrélation multiple (R).

Espèce	Cultivar	R	mo	mx
Zea mays	PHA	0.84	32	73
	POOL-9	0.83	25	73
	IGARAMA-4	0.85	18	70
Sorghum vulgare	GAMBELLA	0.85	21	55
	BM 27	0.83	27	62
	SVR 157	0.85	28	59
Triticum aestivum	ALDAN S-PF70354	0.80	3	61
	ROMANY	0.69	26	66
	COMBIRD	0.69	28	66
X.Triticosecale	MIZAR	0.62	30	69
Phaseolus vulgaris	BVR-Arm	0.71	25	70
	HM 5-1	0.84	21	77
Pisum sativum	DORE DE KIRUNDO	0.85	26	84
	NI 43	0.82	7	73
Arachis hypogea	G 18	0.70	39	88
Solanum tuberosum	MUZIRANZARA	0.62	29	80
	NDINAMAGARA	0.63	28	83
Lupinus luteus	-	0.75	19	87
Vicia sativa	-	0.91	()	72
Mucuna pruriens	UTILIS NOIR 85	0.57	24	95
Panicum maximum	T 58	0.54	39	77

Les seuils optima, dans les sols humifères acides considérés, sont généralement compris entre 20 et 30, sauf pour certains cultivars de blé et de maïs, ainsi que pour l'arachide (mo=39) et la vesce (pas de stimulation). Les valeurs des seuils critiques expriment, en quelque sorte, la capacité de tolérance du matériel végétal à la toxicité aluminique. Les seuils critiques des légumineuses sont expérimentalement plus élevés que ceux des céréales. Cependant, leurs semences sont aussi plus volumineuses, si bien que cette observation ne permet pas de postuler une meilleure tolérance des légumineuses

par rapport aux céréales, dans les conditions de l'expérimentation.

Les seuils critiques varient principalement de manière interspécifique. Le lupin, l'arachide et le mucuna présentent les seuils critiques les plus élevés ($mx > 85$), les céréales les seuils critiques les plus faibles ($mx < 75$). On peut cependant dire qu'au-dessus de " m " = 60, des effets toxiques plus ou moins graves sont détectés pour la grande majorité des espèces considérées. Cette concentration relative de 60% d'aluminium échangeable est dépassée dans l'immense majorité des terres de pâturages naturels d'altitude du Burundi (OPDECAMP et LAUDELOUT, 1985). On propose dès lors de les appeler terres "alliques", ce qualificatif revêtant une signification cartographique et physiologique. Cette caractéristique a été déjà proposée comme critère de classification des sols par OPDECAMP (1986).

ABRUNA-RODRIGUEZ et al. (1982) ont mesuré la sensibilité de plusieurs plantes à tubercules et l'ont simulée également par une fonction parabolique de la concentration en aluminium échangeable. Les seuils critiques que l'on peut calculer à partir de leurs fonctions expérimentales s'élevaient à $mx = 112$ pour le manioc (seuil virtuel), et à $mx = 59$ pour la patate douce. Trois cultures paraissent ainsi particulièrement résistantes à de hautes concentrations en aluminium dans le sol: le théier, le lupin et le manioc. Le mucuna et l'arachide, entre autres, mériteraient une expérimentation complémentaire. On peut penser aussi que de nombreuses espèces ligneuses, forestières, telles que les Eucalyptus et les Pinus par exemple, seraient aussi tolérantes, grâce à des mécanismes physiologiques comparables à ceux du théier (neutralisation de l'activité de l'aluminium par complexation avec des acides organiques dans les feuilles, stimulation par absorption de complexes Al-P).

CONCLUSIONS

Des effets stimulants sur la croissance végétale sont relayés par des effets toxiques, lorsque la concentration en aluminium échangeable des sols humifères augmente, à des pH de plus en plus acides.

Les effets stimulants ont été attribués à une augmentation indirecte de la disponibilité en phosphore, via la formation de complexes Al-P, solubles, métastables et assimilables, qui sont en équilibre, dans le sol, avec une phase hydroxy-alumino-phosphatée amorphe. L'aluminium peut dépasser des concentrations critiques, au-delà desquelles des effets toxiques sont alors enregistrés. L'activité de l'aluminium peut cependant être neutralisée dans certaines espèces, comme le théier, par recomplexation avec des acides organiques. Dans ce cas, les effets stimulants se prolongent à des concentrations plus élevées en aluminium.

D'autres mécanismes de tolérance à de hautes concentrations en aluminium,

existent dans le règne végétal. Cependant, la plupart des espèces cultivées subissent les effets toxiques de l'aluminium, lorsque celui-ci occupe plus de 60% des sites effectifs d'échange sur le complexe adsorbant des sols. Cette concentration est systématiquement dépassée dans les pâturages naturels d'altitude du Burundi, et ces terres ont dès lors été appelées "alliques". Aucune toxicité manganique n'a été diagnostiquée dans les sols humifères acides utilisés.

REMERCIEMENTS

Les travaux ont été conduits dans le cadre d'un contrat de recherche à frais partagés avec la Commission des Communautés Européennes (contrat No. TSD-A-411-RU). Les auteurs remercient Mr.P.HOLLEBOSCH et Mme C.KIBIRITI, qui ont participé aux travaux de caractérisation analytique des sols. Ils remercient également Mr.C.OTDUL et son équipe du service de Biométrie pour les traitements statistiques effectués.

LITTERATURE CITEE.

- ABRUNA-RODRIGUEZ, F., J.VICENTE-CHANDLER, E.RIVERA and J.RODRIGUEZ; 1982. Effect of soil acidity factors on yields and foliar composition of tropical root crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1004-1007.
- BERTRAND, R. et H.AGULHON; 1912. C.R. VIIème Cong. Intern. Chim. Appl., New York, 15, 37.
- BRUGGENWERT, M.G.M. and A.KAMPHORST; 1979. Survey of experimental information on cation exchange in soil systems. In: *Soil Chemistry. B.Physico-chemical models*; G.H. Bolt; Elsevier: 141-203.
- CERIGHELLI, R.; 1955. Cultures tropicales. I.Plantes vivrières, 6-171. Ed. Baillièrre et Fils, Paris.
- CHENERY, E.A.; 1955. A preliminary study of aluminium and the tea bush. *Plant Soil*, 6: 174-200.
- COLEMAN, N.T. and G.W.THOMAS; 1964. Buffer curves of acid clays as affected by the presence of ferric iron and aluminium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28: 187-190.
- DABIN, E.; 1987. Effet du magnésium sur la toxicité aluminique par son action sur l'absorption d'éléments minéraux dans le blé, *Triticum aestivum L.* Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade d'Ingénieur Agronome. UCL. Faculté des Sciences Agronomiques. Départ. Sciences du Sol. 91p.
- DI PASCALE, G. and A.VIOLANTE; 1986. Influence of phosphate ions on the extraction of aluminium by 8-hydroxyquinoline from OH-Al suspensions. *Can. J. Soil Sci.*, 66: 573-579.
- DIXON, J.B. and M.L.JACKSON; 1962. Properties of intergradient chlorite-expandable layer silicates of soils. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 26: 358-362.
- HACKETT, C.; 1962. Stimulative effects of aluminium on plant growth. *Nature*, London, 195: 471-472.
- HSU, P.H. and C.I.RICH; 1960. Aluminium fixation in a synthetic cation exchanger. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24: 21-25.
- KONISHI, S., S.MIYAMOTO and T.TAKI; 1985. Stimulatory effects of aluminium on tea plants grown under low and high phosphorus supply. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 31: 361-368.
- Mc LEAN, E.O., W.R. HOURIGAN, H.E.SHOEMAKER and D.R.BHUMBLA; 1964. Aluminium in soils: V.Form of aluminium as a cause of soil acidity and a complication in its measurement. *Soil Sci.*, 97: 119-126.

- Mc LEOD, L.B. and L.F.JACKSON; 1965. Effect of concentration of the alumine ion on root developpement and establishment of legume seedlings. *Can. J. Soil Sci.*, 45 (2): 221-234.
- OPDECAMP, L. et H.LAUDELOUT; 1985. Mise au point d'une agrotechnologie à minimum d'intrants pour remédier à la toxicité aluminique des hautes terres du Burundi. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, 20 (3/4): 887-894.
- OPDECAMP, L.; 1986. PTR-SAV. Prototype de taxonomie régionale des sols a-volcaniques. A l'usage du cartographe et de l'agronome. Publication ISABU No. 102. 24 p.
- OPDECAMP, L.; 1988. Mécanismes de pédogenèse acide dans les régions agro-pastorales d'altitude du Burundi. Publication ISABU No.127: 14p.
- PELLOUX, P.; 1983. Etude du Mn du sol. Document ORSTOM non publié à l'époque. 15 p.
- RHUE, R.D.; 1979. Differential aluminium tolerance in crop plants. *In: Stress physiology in crop plants. Mussel and Staples (Eds.)*. Wiley-Interscience; 61-80.
- RICH, C.I.; 1960. Aluminium in interlayers of vermiculite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24: 26-32.
- ROBARGE, W.P. and R.B.COREY; 1979. Adsorption of phosphate hydroxy-aluminium species on a cation exchange resin. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 481-487.
- SCHULTZE-KRAFT, R. and D.C.GIACOMETTI; 1978. Genetic ressources of forage legumes for the acid, infertile savannas of tropical America. *In: Pasture production in acid soils of the tropics. Sanchez and Tergas (Eds.)*, Proc. Semin. CIAT, Cali, Colombia (17-21 april 78): 57-64.
- SEGALEN, P.; 1973. L'aluminium dans les sols. *Initiations Doc. Tech.*, ORSTOM, No.22, Paris. 281 p.
- SHEN, M.J. and C.I.RICH; 1962. Aluminium fixation in montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 86: 33-36.
- SIVASUBRAMANIAM, S. and O.TALIBUDEEN; 1971. Effect of aluminium on growth of tea (*Camellia sinensis*) and its uptake of potassium and phosphorus. *J. Sci. Fd Agric.*, 22: 325-329.
- SOIL SURVEY STAFF; 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *Agric. Handbook No.436*; Soil Conservation Service; U.S. Dept. Agric.; U.S. Govt. Printing Office; Washington, D.C. 754 p.
- TANG VAN HAI, X.DE CUYPER et H.LAUDELOUT; 1983. Influence de l'aluminium sur l'absorption du phosphore par le riz (*Oryza sativa* L.) et sur celle de l'azote en présence de différentes concentrations en potassium. *Agronomie*, 3 (5): 417-421.
- TAVERNIER, R. and C.SYS; 1965. Classification of the soils of the Republic of Congo (Kinshasa). *In: Pédologie, Int. Symp.3, Soil Classification (Ghent)*: 91-136.
- TRAINA, S.J., G.SPOSITO, D.HESTERBERG and U.KAFKAFI; 1986. Effects of pH and organic acids on orthophosphate solubility in an acidic, montmorillonitic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 45-52.
- VEITH, J.A. and G.SPOSITO; 1977. Reactions of aluminosilicates, aluminium hydrous oxides, and aluminium oxide with o-phosphate: the formation of X-ray amorphous analogs of variscite and montrebasite. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41: 870-876.