

LA NUTRITION CATIONIQUE DU MAÏS ET LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE

A. LOUÉ

Services agronomiques des Potasses d'Alsace, Mulhouse (Haut Rhin)

SOMMAIRE

Divers essais de fumure potassique sur Maïs, réalisés dans le Sud-Ouest de la France, ont été suivis par diagnostic foliaire (feuille de l'épi) pendant plusieurs années.

L'étude concerne la liaison entre les rendements et la nutrition potassique foliaire. Un niveau critique de teneur en K est proposé.

Les équilibres entre cations majeurs dans la feuille de l'épi sont également passés en revue.

I. — INTRODUCTION

La nutrition minérale du Maïs constitue un très vaste sujet qui fut particulièrement étudié aux États-Unis. Des articles passant en revue les résultats les plus substantiels de la vaste littérature en cause y ont été publiés, en particulier ceux de SAYRE (1955) et de NELSON (1956).

La présente étude concerne le groupe des éléments majeurs qui semble avoir été le moins étudié, celui des cations K-Ca-Mg.

La distinction de l'équilibre entre anions (N-S-P) et de l'équilibre entre cations (K-Ca-Mg) a le mérite de considérer d'une part les éléments dont le rôle est principalement constructeur et d'autre part ceux dont le rôle principal est autre et variable.

Cette conception n'est pas incompatible avec le fait que des proportions convenables doivent exister entre anions et cations. (Du point de vue agronomique, l'étude des interactions $N \times K$ est particulièrement importante dans l'expérimentation des fumures potassiques.)

Les aspects de la nutrition K-Ca-Mg du Maïs peuvent être étudiés par diverses méthodes.

1) En premier lieu la connaissance des symptômes de malnutrition est indispensable, mais d'une application délicate sur le terrain. Cependant, dans le sud-ouest de la France, grande région à maïs, les signes des déficiences en K et Mg peuvent se présenter, notamment sur sables des Landes et sur ces terres très pauvres en bases échangeables que sont les « touyas » des Basses-Pyrénées.

2) Les méthodes rapides d'appréciation des besoins nutritifs, comme l'analyse minérale rapide du suc pétioleaire, ont surtout concerné le Maïs (HOFFER, 1930). Ces tests, très étudiés sur le Maïs aux États-Unis, ne donnent que des informations approximatives (GOODALL, 1947). On se heurte pour le moment, du point de vue recherches, à la grande difficulté d'établir des normes d'interprétation.

3) L'étude de l'accumulation et des mouvements des éléments nutritifs dans la plante au cours de la croissance, jusqu'à la maturité, est de la plus haute importance pour la détermination des besoins en éléments nutritifs. Les graphiques de SAYRE (1948) sur l'accumulation de N, P, K, au cours du cycle sont classiques.

En ce qui concerne les cations, les points suivants sont bien précisés. Le potassium est aussi abondant à la floraison qu'il le sera à la maturité. L'accumulation totale de K dans la plante atteint le maximum trois semaines après la floraison, puis décroît en allant vers la maturité. Le magnésium continue à s'accumuler après la floraison tandis que le calcium cesserait de le faire vers le début de la maturation. Des différences assez importantes semblent exister entre les variétés en liaison avec la tardivité (LOUÉ, 1962).

4) La nutrition cationique du Maïs peut enfin être étudiée par l'examen de la composition chimique d'un organe (diagnostic foliaire) prélevé sur des parcelles, expérimentales ou non, et c'est l'objet de cette étude.

II. — MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

A) MODE DE PRÉLÈVEMENTS FOLIAIRES

La méthode du diagnostic foliaire fut inaugurée sur le Maïs aux États-Unis par THOMAS (1938), puis poursuivie par THOMAS et MACK (1939, 1944). La feuille échantillonnée était alors la 3^e ou la 4^e feuille à partir de la base.

Puis ces études se sont développées, surtout aux États-Unis. TYNER (1946) opère sur la 6^e feuille à partir de la base, sur dix plantes, au moment de la pleine floraison. Les avantages de ce prélèvement seraient les suivants :

- 1) C'est un stade facile à reconnaître ;
- 2) Les variétés mûrissent en un nombre de jours identique après ce stade ;
- 3) Le poids des parties végétatives (tiges et feuilles) est très près du maximum à ce moment ;
- 4) La demande d'éléments nutritifs est très élevée.

Les teneurs des feuilles au stade floraison sont donc les plus typiques, car c'est la période critique pour toutes les variétés.

Ce mode de prélèvement fut également utilisé par BENNET et *al.* (1953) qui récoltaient vingt feuilles par parcelle expérimentale.

En France, le diagnostic foliaire du Maïs a été abordé dans la période récente, notamment par DULAC (1955). Ces prélèvements concernaient les feuilles à l'aisselle desquelles apparaît l'épi principal, en ne conservant que le tiers central et à quatre époques physiologiques :

- 1) Le début de la floraison mâle,
- 2) Le début de la dessiccation des soies,
- 3) quinze jours plus tard,
- 4) le début du jaunissement des spathes.

Les prélèvements effectués dans cette étude concernaient aussi la feuille de l'épi, récoltée sur 60 pieds par parcelle échantillonnée. On ne conservait également que le tiers central de la feuille, la nervure étant éliminée. L'époque fut uniquement celle de la floraison. Sur la plupart des variétés, la sixième feuille est la seconde feuille au-dessous de l'épi le plus élevé. Il intervient donc de ce fait une petite différence par rapport aux prélèvements des auteurs américains.

TABLEAU I

Conditions de sols des essais

	PAU alluvions anciennes (essai simple)		LALUQUE Sable des Landes		Ste-MARTHE Boulbène Lot-et-Garonne	
	sol	sous-sol	sol	sous-sol	sol	sous-sol
Éléments grossiers (sup. à 2 mm) p. 100.....	2,8	1,0	0	0	1,0	0,6
Analyse physique de la terre fine p. 100						
Sable grossier 2 mm à 0,2 mm .	7,0	6,0	46,4	48,4	11,8	12,0
Sable fin 0,2 à 0,05 mm .	11,1	10,7	42,1	40,1	8,4	7,1
Sable très fin 0,05 à 0,02 mm.....	19,1	18,7	2,0	1,9	34,0	29,4
Limon 0,02 à 0,002 mm.....	33,0	34,9	3,0	3,0	28,5	32,0
Argile inf. à 0,002 mm.....	21,7	22,8	2,0	2,0	14,3	17,0
Matière organique (perte au feu).	5,9	4,7	4,5	3,9	2,1	1,5
Analyse chimique de la terre fine (en début d'essai) (1)						
Azote total N p. 1 000.....	2,60	1,95	1,60	1,15	0,80	0,60
Acide phosphorique assim. P ₂ O ₅ p. 1 000.....	0,06	0,04	0,05	0,03	0,08	0,05
Bases échangeables p. 1 000						
K ₂ O.....	0,08	0,06	0,07	0,04	0,07	0,06
CaO.....	2,28	2,11	1,38	1,13	1,08	0,95
MgO.....	0,10	0,10	0,13	0,14	0,15	0,14
pH.....	6,5	6,6	6,1	6,2	5,9	6,0

(1) *Pau*. — Pour l'essai complexe maïs, les teneurs moyennes en K₂O échangeable, en quatrième année, ont été pour K₀, K₁, K₂, respectivement de 0,07 p. 1 000, 0,09 p. 1 000 et 0,14 p. 1 000, la teneur initiale étant de 0,06 p. 1 000.

En 1958, sur l'essai simple, en 8^e année d'essai, les teneurs pour K₀, K₁, K₂ ont été de 0,05 p. 1 000, 0,08 p. 1 000, 0,12 p. 1 000. En 1961, pour les soles en maïs depuis quatre ans, ces teneurs devinrent respectivement 0,06 p. 1 000, 0,11 p. 1 000, 0,15 p. 1 000 (tandis que pour les soles en prairie intensive, les teneurs étant de 0,06 — 0,07 — 0,07, il n'y avait aucun effet des fumures potassiques, les exportations ayant été très élevées en K₁ et K₂).

Laluque. — Les analyses en fin d'essai n'ont indiqué aucune influence des traitements sur la teneur en magnésium échangeable. Par contre, elles ont traduit une diminution marquée de la teneur en K₂O échangeable (0,03 p. 1 000 pour le sol et le sous-sol) en NPK₀ et l'absence d'enrichissement pour les autres traitements (0,06 p. 1 000 et 0,05 p. 1 000 pour le sol et le sous-sol).

Sur ces essais l'enrichissement en P₂O₅ assimilable fut toujours accusé, les taux remontant vers 0,18 p. 1 000.

B) ORIGINE DES PRÉLÈVEMENTS FOLIAIRES

Les échantillons foliaires ont été prélevés sur des essais d'engrais réalisés dans le sud-ouest de la France par le Service de l'Expérimentation agronomique des Potasses d'Alsace (LOUÉ, 1961).

a) Principaux essais d'engrais suivis par diagnostic foliaire

Les principaux essais étudiés furent :

Pau (Basses-Pyrénées) — essai complexe de 36 parcelles, suivies en 1954, 1955, 1956 — essai portant sur l'étude de trois niveaux d'azote (N_0 , N_1 , N_2 soit 0,40, 80 kg N/ha) combinés à trois niveaux de potasse (K_0 , K_1 , K_2 soit 0, 80, 160 kg K_2O /ha) à partir de chlorure.

Pau (Basses-Pyrénées) — essai simple comportant quatre soles en maïs et quatre soles en prairie et pour chaque sole trois doses de potasse (K_0 , K_1 , K_2 soit 0, 100, 150 kg K_2O /ha à partir de chlorure), soit 12 parcelles en maïs, suivies en 1955, 1956, 1957, 1961.

Laluque (Landes) — essai de 20 parcelles, quatre répétitions des traitements NPK₀, NPK' (150 unités K_2O du chlorure), NPK'' (150 unités K_2O du bicarbonate) NPK'Mg et NPK''Mg (50 unités MgO).

Sainte-Marthe (Lot-et-Garonne) — essai complexe de 30 parcelles suivies depuis 1961 — portant sur l'étude de deux niveaux d'azote N_1 et N_2 (soit 80 et 120 kg N/ha) combinés à trois niveaux de potasse K_0 , K_1 , K_2 (soit 0, 80, 120 kg K_2O /ha).

b) Conditions de sols des essais

Les conditions de sols de ces essais (tableau 1) correspondent à des types de sols importants pour la culture du Maïs dans le Sud-Ouest tels que : alluvions anciennes à Pau, sables des Landes à Laluque, boubènes de terrasse de la Garonne à Sainte-Marthe.

III. — RÉSULTATS

Cette expérimentation axée sur l'étude de la fertilisation potassique permet précisément d'obtenir des diagnostics parcellaires différenciés, particulièrement grâce à la poursuite des essais sur plusieurs années, et cette différenciation permet d'éclaircir quelque peu le problème de la nutrition cationique du Maïs.

Les cations majeurs K, Ca, Mg se répartissent dans les diverses parties du végétal dans des proportions qui ne sont pas indifférentes à l'obtention de bons rendements. L'examen de ces quantités et proportions dans la feuille choisie à cet effet doit permettre d'apprécier la nutrition cationique. Les concepts en cause sont ceux de niveaux critiques, équilibre nutritif et consommation de « luxe ».

A) EXPRESSION DES RÉSULTATS

Les teneurs foliaires sont exprimées en éléments N, P, K, Ca, Mg pour cent de matière sèche (tableau 2) et ce mode d'expression sera seul utilisé pour les notions de niveaux critiques, de consommation de « luxe ».

Par contre, pour les concepts mettant en jeu des sommes et des rapports (cations totaux $S = K + Ca + Mg$, équilibres des cations 100 K/S, 100 Ca/S, 100 Mg/S) on utilisera l'expression en nombres de milliéquivalents.

TABLEAU 2
Diagnostic foliaire maïs

	Teneurs en éléments pour cent de matière sèche					Cations totaux	% de S			quintaux grains secs hectare	
	N	P	K	Ca	Mg	S = K + Ca + Mg en méq.	K	Ca	Mg		
<i>Essai complexe de Pau</i>											
1954	K ₀	3,84	0,49	0,60	1,21	0,83	144,0	10,6	42,0	47,4	23,6
	K ₁	4,00	0,34	1,81	0,85	0,34	116,9	39,7	36,3	24,0	65,2**
	K ₂	3,99	0,33	2,29	0,77	0,23	116,0	50,6	33,2	16,2	70,8**
1955 sans fumier	K ₀	3,44	0,39	0,96	0,85	0,65	120,5	20,4	35,3	44,3	43,8
	K ₁	3,58	0,39	1,56	0,60	0,42	104,5	38,3	28,7	33,0	62,3**
	K ₂	3,56	0,39	1,94	0,50	0,34	102,7	48,4	24,3	27,3	65,1**
1955 avec fumier	K ₀	3,56	0,39	1,41	0,62	0,53	110,7	32,6	28,0	39,4	62,2
	K ₁	3,40	0,38	1,85	0,51	0,38	104,2	45,5	24,5	30,0	67,0**
	K ₂	3,51	0,41	1,93	0,50	0,35	103,3	47,9	24,2	27,9	70,8**
1956 sans fumier en 1955	K ₀	3,49	0,33	0,61	1,30	0,70	138,1	11,3	47,0	41,7	18,8
	K ₁	3,51	0,28	1,57	0,86	0,36	112,8	35,6	38,1	26,3	51,9**
	K ₂	3,64	0,29	2,03	0,70	0,33	114,2	45,5	30,6	23,9	58,5**
1956 avec fumier en 1955	K ₀	3,45	0,29	0,97	1,16	0,56	128,9	19,3	45,0	35,7	45,0
	K ₁	3,45	0,28	1,79	0,84	0,32	114,2	40,2	36,8	23,0	61,3**
	K ₂	3,66	0,28	2,04	0,72	0,28	111,3	47,0	32,3	20,7	60,7**
<i>Essai simple de Pau — sole 3</i>											
1955	K ₀	3,89	0,35	1,79	0,59	0,31	100,9	45,5	29,2	25,3	78,9
	K ₁	3,89	0,35	1,99	0,67	0,25	105,0	48,6	31,9	19,5	73,5
	K ₂	3,82	0,34	2,05	0,69	0,36	116,6	45,0	29,6	25,4	81,3
1956	K ₀	4,16	0,34	1,28	1,11	0,44	124,5	26,3	44,6	29,1	68,8
	K ₁	4,18	0,35	1,99	0,76	0,29	112,8	45,2	33,7	21,1	65,6
	K ₂	4,19	0,35	2,35	0,72	0,24	115,9	51,9	31,1	17,0	70,1
1961	K ₀	3,44	0,60	0,48	1,28	0,79	141,3	8,7	45,3	46,0	
	K ₁	3,68	0,34	1,20	1,20	0,44	126,9	24,2	47,3	28,5	
	K ₂	3,56	0,29	1,43	1,06	0,34	117,6	31,1	45,1	23,8	
<i>Essai de Lahuque (Landes)</i>											
1957	K ₀	3,84	0,30	1,57	1,09	0,34	122,7	32,7	44,4	22,9	46,1
	K	4,00	0,31	1,92	0,87	0,28	115,7	42,5	37,6	19,9	51,4*
	KMg	3,88	0,33	1,90	0,78	0,29	111,5	43,7	35,0	21,3	52,5*
<i>Essai de Ste-Marthe (boulbène en Lot-et-Garonne)</i>											
1961	K ₀	3,39	0,30	1,12	1,15	0,74	147,1	19,5	39,0	41,5	39,1
	K ₁	3,38	0,29	1,33	1,05	0,59	135,1	25,2	38,8	36,0	42,0*
	K ₂	3,45	0,30	1,51	0,98	0,57	134,5	28,8	36,4	34,8	43,2**

B) LES TENEURS FOLIAIRES ENREGISTRÉES

Le tableau 2 rapporte les résultats essentiels résumés par les teneurs foliaires moyennes et équilibres nutritifs moyens des divers traitements K₀, K₁, K₂.

Dans la dernière colonne figurent les rendements moyens des traitement K₀, K₁, K₂, en grains à 15 p. 100 d'humidité, avec le degré de signification correspondant.

IV. DISCUSSION

A) LA NUTRITION ANIONIQUE DU MAÏS ET LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE

Il ne s'agit ici que d'un simple examen séparé des teneurs de la feuille en N et P. COÏC *et al.* (1961) ont étudié l'influence comparée de la déficience en phosphore sur l'absorption des anions-cations en présence d'une alimentation azotée ammoniacale ou nitrique.

a) *Les niveaux azotés*

Les études de diagnostic foliaire du Maïs ont surtout concerné les niveaux azotés.

TYNER (1946), BENNETT *et al.* (1953), ANDHARIA *et al.* (1953), VIETS *et al.* (1954), DULAC (1955), SOUBIES *et al.* (1956), DUMENIL (1961) ont mis en lumière la liaison nette existant entre les rendements et le taux d'azote de la feuille à l'époque des floraisons.

TYNER (1946) a proposé comme niveau critique (au-dessus duquel la réponse à l'azote serait douteuse et faible), 3,10 p. 100, BENNETT *et al.* (1953) ont estimé que la teneur critique pouvait varier à l'intérieur d'une zone étroite (2,80 à 3,00 p. 100).

VIETS *et al.* ont trouvé de leur côté 2,83 p. 100 pour niveau critique et 2,20 p. 100 pour le seuil d'apparition des signes du manque d'azote.

DULAC a vérifié la liaison azote-rendement pour un intervalle de rendement de 48 à 93 quintaux, couvert par une variation de teneurs s'étalant de 2,3 à 3,5 p. 100.

Chez le Maïs, l'azote contrôle la croissance et les majorations de rendements à attendre de l'usage des engrais phosphatés et potassiques. Pour étudier les liaisons éventuelles entre les teneurs potassiques foliaires et les rendements, il est nécessaire de se placer dans la zone de nutrition azotée correcte. Cette condition fut remplie dans les essais étudiés (même au niveau N₀ de l'essai de Pau, en liaison avec la richesse du sol de cet essai à cet égard).

b) *Les niveaux phosphorés*

TYNER avait proposé comme niveau critique une teneur de 0,315 p. 100 (en P) et ses observations s'échelonnaient de 0,19 à 0,38 p. 100 P.

Ici la variation s'est inscrite entre 0,28 et 0,70 p. 100 de P pour les traitements K₀ et entre 0,26 et 0,42 p. 100 P pour les divers traitements K₁ et K₂ (avec un très petit nombre d'observations entre 0,26 et 0,30 p. 100 P).

La nutrition phosphorée a donc pratiquement été très correcte (si l'on excepte les teneurs excessives notées sur certaines parcelles très carencées en potasse).

B) LA NUTRITION CATIONIQUE DU MAÏS ET LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE

a) ÉTUDE DES NIVEAUX POTASSIQUES FOLIAIRES.

1°) *Sur les divers essais**Essai complexe de Pau.*

La figure 1 rapporte la dispersion des 108 rendements parcellaires correspondant aux trois années 1954, 1955, 1956, en fonction des 108 teneurs potassiques foliaires.

Parcelles K₀. — Les teneurs en potassium des feuilles des parcelles K₀ sont

très faibles. Les traitements K_0 ont présenté des rendements moyens aberrants, de 24 q/ha en 1954, 19 q/ha en 1956 avec des teneurs foliaires moyennes en potassium correspondantes de 0,60 p. 100 et 0,61 p. 100. En 1955, par suite d'une climatologie favorable, ce rendement moyen s'est élevé à 44 q, avec une amélioration très marquée de la nutrition potassique (K moyen = 0,96 p. 100).

Les teneurs inférieures à 0,70 p. 100 sont donc des teneurs de véritable carence accompagnées de rendements inférieurs à 25 q.

La dispersion des points K_0 (0,41 à 1,27 K p. 100 et 8 à 54 q) exprime bien tous les degrés de la déficience, depuis la carence ($K < 0,60$ p. 100), la très grave déficience (K entre 0,60 et 1,00), la déficience nette (K entre 1,00 et 1,30 p. 100).

Parcelles $K_0 + fumier$. — En 1955, on a apporté du fumier sur 2 des 4 blocs de l'essai, à raison de 25 t/ha. Le rendement moyen des traitements $K_0 + fumier$ fut alors de 62 q avec une teneur moyenne de $K = 1,41$ p. 100.

En 1956, le rendement moyen de ces traitements est retombé à 45 q, tandis que la teneur moyenne retombait à $K = 0,97$ p. 100.

Parcelles K_1 . — L'amélioration de la nutrition potassique avec l'apport de $K_1 = 80$ kg/ha de K_2O a été considérable. Sur les trois ans, les teneurs extrêmes ont été de 1,37 et 1,97 p. 100. La moyenne générale des parcelles K_1 est $K = 1,65$ p. 100 avec un rendement moyen sur cinq ans de 66 q. Il est donc certain que pour des teneurs allant de 1,25 à 1,65 p. 100 les rendements s'accroissent en fonction du taux de potassium dans la feuille.

A ce point de la courbe, il importe de savoir si, dans le cas présent, la dose de 80 kg K_2O a permis une nutrition potassique optimale ou si ce point n'a pas été atteint, et ce problème est lié à celui de la détermination d'un seuil critique de teneur potassique foliaire.

Parcelles $K_1 + fumier$. — La comparaison des parcelles K_1 et $K_1 + fumier$ suggère que l'optimum nutritif en potassium n'a pas été atteint en K_1 .

En 1955, les rendements moyens ont été respectivement de 62,3 et 67 q/ha avec des teneurs foliaires en potassium : $K = 1,56$ et 1,85 p. 100.

En 1956 les rendements moyens ont été de 51,9 et 61,3 q/ha avec des teneurs foliaires en potassium : $K = 1,57$ et 1,79 p. 100.

Donc, abstraction faite des autres effets du fumier sur les rendements, à la supériorité de $K_1 + fumier$ correspond une nutrition potassique plus intense. Le fumier a apporté au niveau d'apport $K_1 = 80$ kg/ha de K_2O , un supplément de potassium utilisé avec profit par le Maïs.

Parcelles K_2 . — Les teneurs potassiques foliaires des parcelles K_2 sont régulièrement supérieures à celles des parcelles K_1 , la variation étant de 1,80 à 2,43 p. 100. Les écarts sont suffisamment amples pour, en premier lieu, être significatifs et, en second lieu, ne pas correspondre, au moins dans leur totalité, à une sorte de « consommation de luxe ». L'apport de 160 kg/ha de K_2O a donc accru la nutrition potassique par rapport à K_1 .

Les écarts moyens des teneurs foliaires $K_2 - K_1$ ont été respectivement de + 0,48 en 1954, + 0,38 en 1955, + 0,46 en 1956.

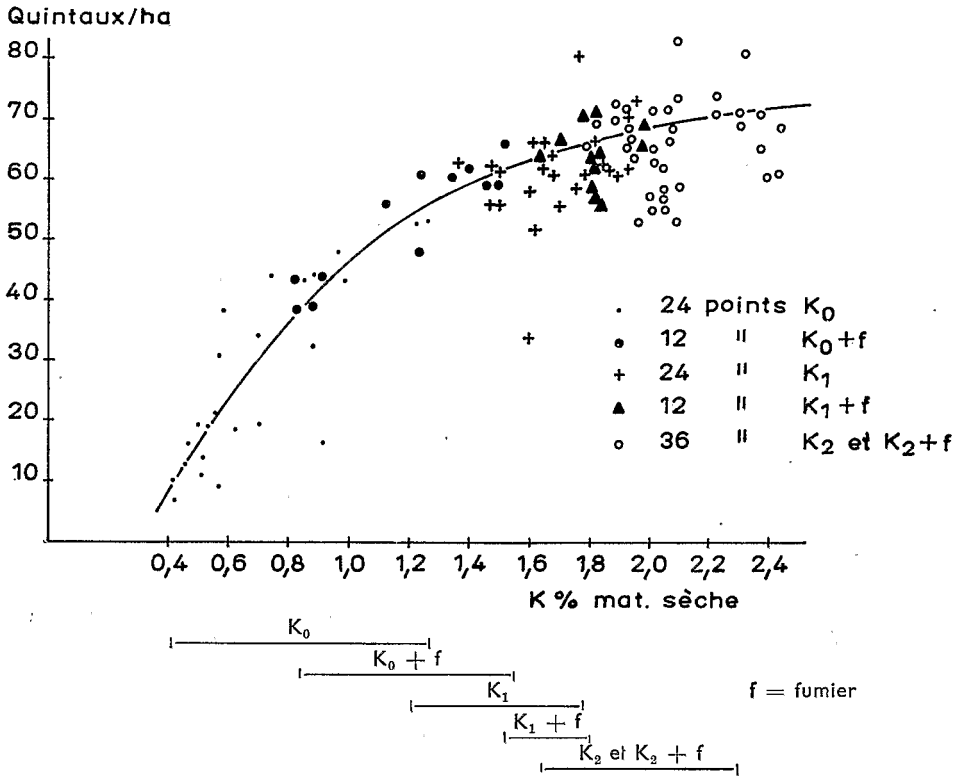


FIG. 1. — Essai complexe Pau. Relation entre les rendements en grains (15 % humidité) et la teneur en K de la feuille au-dessous de l'épi à la floraison.

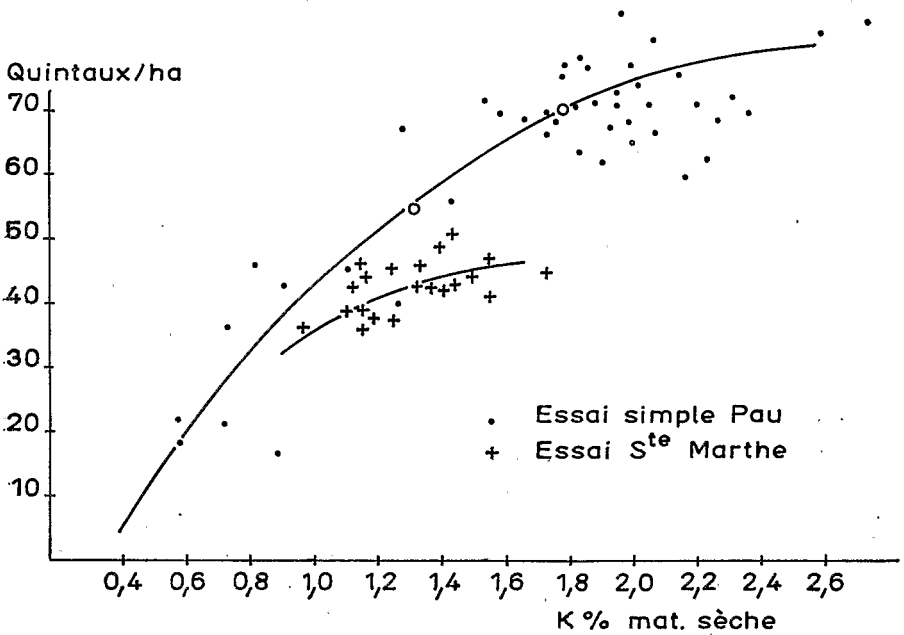


FIG. 2. — Relation entre les rendements en grains (15 % humidité) et la teneur en K de la feuille au-dessous de l'épi à la floraison

Parcelles K_2 + fumier. — La comparaison des traitements K_2 et K_2 + fumier est instructive. En 1955 et en 1956, il n'y a aucune différence dans les teneurs foliaires. Cela tend à montrer, en opposition avec l'observation faite au niveau d'apport K_1 , que la nutrition potassique avait atteint le maximum avec l'apport K_2 . D'autre part, les teneurs potassiques foliaires des parcelles K_1 + fumier n'atteignent pas celles des parcelles K_2 sans fumier. Or les rendements moyens de K_1 + fumier et K_2 sans fumier ont été respectivement de 67,0 et 65,1 q/ha en 1955 et de 61,3 et 58,5 q/ha en 1956. Cela semble indiquer que les teneurs potassiques foliaires atteintes en K_1 + fumier correspondaient sensiblement à l'optimum.

Autres essais.

Essai simple K_0 , K_1 , K_2 de Pau. — Le diagnostic foliaire effectué sur l'essai simple de Pau depuis 1955 confirme ces observations (fig. 2). Sur le tableau 2 figurent seulement les données relatives à la sole 3 (en maïs en 1955 et 1956, en prairie temporaire de 1957 à 1960, à nouveau en maïs en 1961.)

En 1955, un apport élevé de fumier avait résorbé la carence potassique des parcelles K_0 (teneur en K = 1,79 p. 100 donc optimum). En 1956, le niveau tombe à 1,30 p. 100 traduisant l'arrière-action du fumier précédent. L'épuisement dû à la prairie a été considérable et le maïs de 1961 est très gravement carencé pour K_0 , nettement déficient pour K_1 , et déficient pour K_2 .

Essai de Labuque (sables des Landes). — Les diagnostics chimiques ont montré qu'en 1957 les niveaux potassiques des traitements K_0 étaient légèrement faibles (1,60 p. 100 contre 1,90 p. 100 pour les traitements K et K Mg). En 1958, la moyenne des parcelles K_0 tombe à 1,30 p. 100 contre 1,75 p. 100 pour K et K Mg. Cependant, le rendement put se maintenir à un niveau correct en K_0 en 1959.

Essai de Sainte-Marthe (boulbène du Lot-et-Garonne). — Les doses de K_2O appliquées ont eu un effet très marqué sur les niveaux potassiques foliaires (tableau 2), $K_1 - K_0$ étant hautement significative et $K_2 - K_1$ significative. La dose K_1 a donné un supplément de rendement significatif de 3 q et la dose K_2 un supplément de rendement hautement significatif de 4 q ($K_2 - K_1$ sans signification.)

Un facteur limitant primordial, l'alimentation hydrique, a joué ici en 1961 et les rendements, tout en exprimant une liaison nette avec les teneurs potassiques foliaires (fig. 2) se situent dans une zone nettement plus basse que celle des courbes de Pau.

2°) *Relations entre les niveaux potassiques foliaires et les rendements*

Les études sur les relations entre les teneurs de la feuille en potassium et les rendements du Maïs sont très peu nombreuses.

TYNER (1946), étudiant une gamme de teneurs allant de 0,7 à 2,0 p. 100 a trouvé une corrélation hautement significative et proposé une concentration critique en K, de la 6^e feuille à floraison, de 1,30 p. 100, en précisant que ce niveau pourrait être révisé, car il n'y avait pas d'indication nette de l'existence d'un point à partir duquel la tendance de liaison linéaire entre les rendements et les teneurs en K disparaîtrait.

KRANTZ et CHANDLER (1951) observèrent une liaison étroite entre les teneurs

des feuilles en potassium et les apports, allant de 0 à 320 kg K_2O /ha sur des sols diversement dotés de K échangeable. Les rendements furent accrus avec les doses de 80 kg K_2O sur les sols mieux pourvus et par les doses 60 et 120 kg K_2O sur le sol pauvre. Ces auteurs considèrent les teneurs enregistrées avec les doses 120 kg K_2O comme « consommation de luxe » sur les sols à 0,23 et 0,28 méq. K.

0,10 méq. K		0,23 méq. K		0,28 méq. K	
kg K_2O	K %	kg K_2O	K %	kg K_2O	K %
0	0,51	0	1,65	0	1,26
60	1,18	80	1,76	80	1,74
120	1,56	120	2,00	120	1,90
		160	2,04	320	2,14
		320	2,18		

WITTELS et SEATZ (1953), ont établi que le niveau critique de potassium nécessaire dans les feuilles était de 1,5 p. 100, 60 jours après la plantation et 1,7 p. 100 dans les stades ultérieurs de la croissance. Ces auteurs considèrent les teneurs supérieures à 1,7 p. 100 comme de « consommation de luxe ».

BENNETT, STANFORD et DUMENIL (1953) enregistrèrent un petit nombre de données comprises entre 1,42 et 2,12 p. 100 K, pour la 6^e feuille.

DELONG, MAC KAY et STEPLER (1953) obtinrent des teneurs moyennes en potassium comprises entre 2,04 et 3,15 p. 100 pour la feuille de même position que celle ici étudiée, donc des teneurs élevées, dans une zone d'indifférence au moins relative.

VIETS, NELSON et CRAWFORD (1954) enregistrèrent des variations de teneurs entre 1,90 et 2,79 p. 100, et, par suite, peu de relation avec les rendements.

ELLIS et *al.* (1956), associèrent les teneurs foliaires inférieures à 1,30 p. 100 K aux sols présentant moins de 200 livres par acre de potasse échangeable (soit 0,10 p. 1000 de sol) et notèrent que l'application de 90 kg K_2O par hectare à de tels sols amenait les teneurs au-dessus du seuil critique de TYNER.

Enfin BOSWELL et PARKS (1957), étudiant l'effet de divers niveaux potassiques du sol sur la composition minérale du Maïs indiquent pour les traitements sans K_2O , les teneurs foliaires suivantes (K = 1,2 p. 100, Ca = 0,8 p. 100, Mg = 0,9 p. 100) et pour les traitements à forte fertilisation potassique (K = 3,5 p. 100, Ca = 0,5 p. 100, Mg = 0,2 p. 100), sans précision sur une zone critique pour K.

La présente étude semble permettre une approche plus poussée de ce problème.

L'examen de la figure 1 suggère qu'en fait la relation plus générale entre les rendements et les teneurs potassiques foliaires n'est pas linéaire, mais curvilinéaire.

En première approximation, la méthode graphique montre que pour les teneurs allant de 0,4 à 1,0 p. 100 environ, zones de carence et de grave déficience, la corrélation est très forte. Pour un accroissement de la teneur de 0,1 p. 100 K, le rendement s'accroît d'environ 5 quintaux/hectare.

On observe ensuite une seconde zone, pour des teneurs allant de 1,0 p. 100 à environ 1,6 p. 100 dans laquelle la corrélation demeure nette, mais où une augmentation de 0,1 p. 100 K ne provoque plus une élévation de rendement que de 2,5 q/ha environ.

La teneur de 1,3 p. 100 est certainement inférieure au niveau critique. Le rendement moyen correspondant à cette teneur serait d'environ 55 quintaux, nettement inférieur au rendement moyen de l'essai complexe (66 q sur 5 ans pour K_1). On remarque par contre que l'obtention de rendements de 65 quintaux apparaît pour des teneurs comprises entre 1,7 et 1,8 p. 100 K. D'autre part, la feuille considérée par TYNER (seconde feuille au-dessous de l'épi supérieur) étant ainsi plus âgée que celle ici échantillonnée, il peut exister de ce fait une différence de niveaux.

Au-delà de 1,6 à 1,7 p. 100, on entre dans un nuage de points. Graphiquement on peut fixer à 1,7 p. 100 le niveau critique, teneur au-dessus de laquelle il n'y a pas de liaison entre les teneurs en K de la feuille considérée (la première au-dessous de l'épi supérieur) et les rendements.

L'étude précédente des niveaux potassiques, en fonction des traitements avait conduit à considérer la teneur moyenne des plantes K_1 (1,65) comme un peu inférieure à l'optimum qui peut être proposé à 1,80 p. 100 environ.

En fait, quelle que soit la méthode utilisée, il est très difficile d'indiquer une teneur précise qui serait un véritable niveau critique. Il serait préférable d'indiquer une zone critique, de 1,7 à 2,0 p. 100 par exemple. Pour les teneurs supérieures à 2,0 p. 100 environ il y aurait consommation indifférente. A partir de cette zone, il conviendrait de considérer surtout l'équilibre des trois cations majeurs, selon un principe assez semblable à celui proposé par DUMENIL (1961) pour apprécier la balance nutritive N/P près du rendement maximum.

Mais la notion de zone critique, qui semble devoir être préférée à celle de seuil critique en ce qui concerne à tout le moins K, est elle-même contingente. Elle dépend en particulier de l'alimentation en eau. L'examen sur la fig. 2, des points correspondant à l'essai de Sainte-Marthe (grave sécheresse estivale en 1961) suggère que le seuil critique se serait situé vers les teneurs des traitements K_1 (1,30 p. 100 environ).

En un même point, l'effet des fumures potassiques est variable selon les années. Dans les années les plus favorables, la zone critique peut être de 1,80 à 2,00 p. 100 ; dans les cas de déficience hydrique, elle peut tomber vers 1,30 à 1,40 p. 100 ; dans les cas de bonnes conditions, elle serait de 1,60 à 1,80 p. 100.

D'autre part, le diagnostic foliaire de variétés différentes placées dans des conditions identiques semblerait indiquer des différences de nutrition potassique non négligeables, et le niveau critique pourrait dépendre de la variété (LOUÉ, 1962).

	Iowa 4417	W 690	Funk G 75	United 32
Alluvions.....	1,32	1,56	1,58	1,42
Boulbènes.....	1,50	1,66	1,60	1,44
Terrefort.....	1,33		1,62	1,58

La notion de zone critique de teneur en K ne semble donc pas directement utilisable en vue de la détermination de la fertilisation potassique. L'examen des niveaux potassiques foliaires en fonction des doses de K_2O appliquées sur un type de sol donné fournit des indications précises.

Remarquons enfin que TYNER (1946) avait émis l'hypothèse que le sodium pourrait sous certaines conditions se substituer en partie au potassium dans la nutrition de la plante, ce qui pourrait entraîner une baisse du niveau critique en K. Cela ne fut pas observé sur les essais suivis. Les teneurs en sodium furent toujours infimes, de 0,01 à 0,02 Na p. 100 à Pau et de 0,03 à 0,04 Na p. 100 à Lалуque sur sable

des Landes, ce qui corrobore les études de TRUOG, BERGER, ATTOE (1953), LARSON et PIERRE (1953), COPE et *al.* (1953) qui montrèrent que le Maïs absorbe très peu de sodium, même si le milieu en est bien pourvu.

b) ÉTUDE DES NIVEAUX CALCIQUES ET MAGNÉSIENS.

La plupart des auteurs précités ont étudié également les teneurs foliaires en Ca et Mg.

VIETS et *al.* (1954) indiquent que les engrais appliqués ont eu sur les niveaux Ca et Mg un effet inverse de celui sur K, la somme des trois cations demeurant sensiblement constante, vers 100 méq pour 100 g. Ca a varié entre 0,36 et 0,55 p. 100 et Mg entre 0,14 et 0,21 p. 100.

DE LONG et *al.* (1953) enregistrèrent de fortes corrélations négatives significatives entre les teneurs K et Mg ; Mg variant de 0,31 à 0,65 p. 100 et Ca ayant une variation de faible amplitude entre 0,52 et 0,58 p. 100.

WITTELS et SEATZ (1953) font remarquer que durant les premiers stades de la croissance, la teneur des plantes en Ca présente peu de variation en fonction des apports potassiques, traduisant cependant dans les feuilles une liaison inverse avec K. En particulier, 60 jours après la plantation la teneur calcique foliaire varie de 0,30 à 0,60 p. 100 selon les traitements K_2O .

BOSWELL et PARKS ont également montré qu'avec l'élévation de la fumure potassique, les niveaux foliaires Ca et Mg décroissent.

ELLIS et *al.* (1956) notèrent aussi que l'addition de K à des sols pauvres en K échangeable engendrait une baisse des teneurs magnésiennes des feuilles, tandis que le calcium était moins influencé.

Ici même, sur l'essai de Pau, on a enregistré des corrélations négatives élevées entre les teneurs en K et celles en Ca et Mg. Les échantillons foliaires des parcelles K_0 sont régulièrement nettement plus riches en Ca et Mg que ceux des parcelles K_1 , eux-mêmes légèrement plus riches que ceux des parcelles K_2 (tableau 2).

Sur la figure 3, ont été reportées les teneurs en Ca et Mg en fonction des teneurs en K. En considérant les tangentes aux courbes approchées, on constate facilement que la zone du déficit en K est celle de l'antagonisme K — Mg, que la zone des hauts niveaux potassiques est celle de l'antagonisme K — Ca et que la zone intermédiaire correspond à une assez forte corrélation positive entre Ca et Mg, qui décroissent avec K croissant.

STANFORD et *al.* (1942) étudièrent la balance des cations chez le Maïs, en relation avec la déficience potassique, en se servant comme indice du rapport $(Ca + Mg)/K$ (dans la plante jeune), exprimé en milliéquivalents. Pour les valeurs inférieures à 3,5 la nutrition serait normale et pour les valeurs supérieures à 5,0 la déficience serait plus ou moins sévère. Ces valeurs ne peuvent pas être appliquées aux échantillons de diagnostic foliaire. Notons que pour les points K, Ca, Mg suivants des courbes de la figure 3 (0,78-1,26-0,62) — (0,90-1,24-0,55) — (1,17-1,15-0,44) — (1,60-0,98-0,30) — on trouve les valeurs suivantes : 5,75-4,60-3,13-1,80.

En liaison avec l'existence de niveaux potassiques très élevés, peut se poser le problème des déficiences calciques ou magnésiennes induites par ces excès éventuels.

Calcium. — Dans les essais considérés, les teneurs en calcium ne sont jamais tombées dans une zone de déficience.

Ca et Mg %

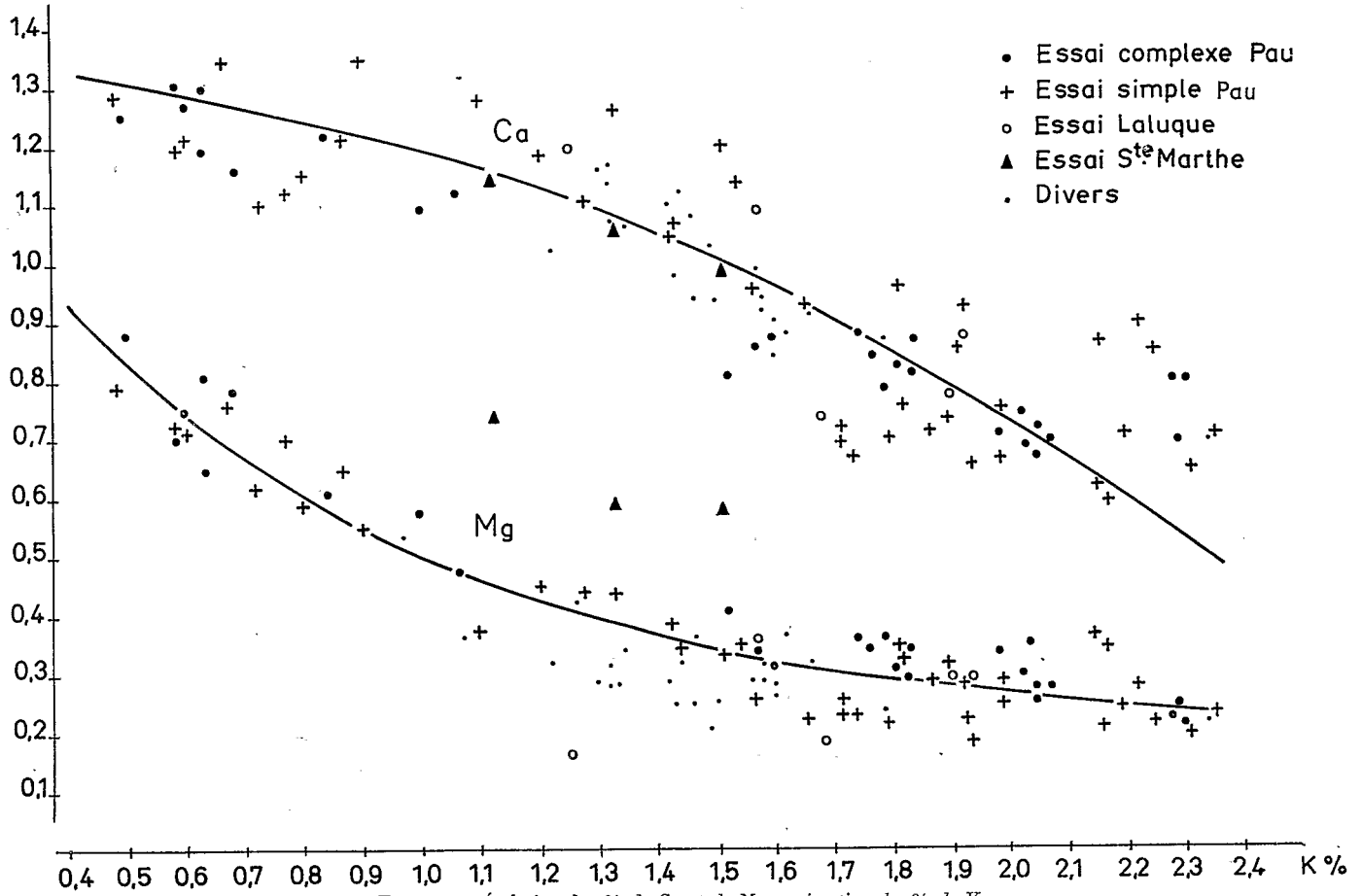


FIG. 3. — Évolution des % de Ca et de Mg en fonction du % de K

La déficience calcique sur Maïs a été étudiée en particulier par MELSTED (1953). Les plantes montrant les symptômes typiques contenaient moins de 0,2 p. 100 Ca (plante entière). La teneur du sol était de moins de 2 méq Ca échangeable pour 100 g.

Magnésium. — L'opinion doit être plus nuancée; la teneur moyenne inférieure (0,22 p. 100) est exclusive de symptômes magnésiens. Mais sur certaines parcelles, la teneur a été réellement faible (0,16 à 0,18 p. 100).

La déficience magnésienne sur Maïs a été semble-t-il très peu étudiée. JONES (1929) avait indiqué l'absence de symptômes pour des teneurs foliaires de 0,20 p. 100, leur gravité vers 0,07 p. 100.

Récemment, FOY et BARBER (1958) ont montré que certaines lignées de Maïs diffèrent plus ou moins dans leur faculté d'accumulation de magnésium dans les feuilles. Ils ont montré que les faibles concentrations de Mg des feuilles de certaines variétés étaient surtout dues à une immobilisation de Mg dans les tiges. D'autre part, ces auteurs étudièrent des essais combinant deux doses de potasse (100 et 500 kg K_2O_2 /ha) et deux doses de magnésium (0 et 75 kg Mg/ha). Sur certains sols, les deux traitements potassiques ont induit une déficience magnésienne très typique (feuilles à haut niveau K, à très bas niveau Mg). Mais la manifestation de cette déficience Mg ne fut pas accompagnée d'une baisse des rendements. Les apports de Mg prévinrent contre la manifestation de symptômes, accrurent significativement la teneur en Mg, diminuèrent celle en K, mais n'affectèrent pas les rendements.

La teneur en Mg, associée aux symptômes catégoriques serait de 0,06 p. 100 pour la 6^e feuille. Avec les apports de 75 kg Mg et 100 kg K_2O , les symptômes devinrent moins nets et la teneur était de 0,13 p. 100 (FOY et BARBER 1958).

Les teneurs associées aux symptômes seraient, semble-t-il, inférieures à 0,10 p. 100 pour la première feuille au-dessous de l'épi.

L'explication du manque d'effet sur les rendements serait la suivante selon les mêmes auteurs : la nutrition magnésienne des plantes déficientes fut suffisante pour satisfaire aux fonctions de Mg non liées à la fonction chlorophyllienne mais insuffisante pour la production normale de chlorophylle. La pleine production chlorophyllienne ne fut pas nécessaire pour atteindre le niveau de rendement permis par les autres facteurs et les rendements ne furent pas réduits par l'existence des symptômes.

L'antagonisme K — Mg qui concerne la fonction « catalytique » du magnésium fut étudié par CALMES (1959) d'un point de vue physiologique. Ayant constaté cet antagonisme, cet auteur se demande s'il ne vaudrait pas mieux parler de complémentarité. En effet, calculant la somme K + Mg en milliéquivalents, il lui trouve une assez bonne constance qu'il explique en supposant que le potassium et le magnésium assurent en majeure partie l'équilibre ionique des liquides contenus dans les limbes. CALMES montre également que les quantités totales de K et Mg contenues dans les limbes sont proportionnelles aux poids frais des limbes. La plante absorberait au fur et à mesure de ses besoins ces deux cations qui assurent son équilibre ionique.

Sur la figure 3, on remarque bien que la liaison inverse K — Mg est plus nette et plus régulière que la liaison inverse K — Ca. Mais ceci est surtout valable pour les teneurs en K inférieures à 1,30 p. 100. Dans ces limites on observe généralement une assez faible amplitude de variation pour les teneurs calciques. Cependant le remplacement joue nettement au profit de Ca pour les teneurs en K supérieures à environ 1,30 p. 100 ainsi que le montrent les équilibres K/Ca/Mg.

c) LA SOMME $S = K + Ca + Mg$.

La somme $S = K + Ca + Mg$ des cations majeurs absorbés présente pour la feuille considérée des variations d'amplitude assez faible.

Certains des auteurs précités ont mis l'accent sur la constance relative de S pour la 6^e feuille, avec une valeur moyenne de 100 à 105 méq pour 100 g. Ici S fut trouvée d'une bonne stabilité pour les parcelles K_1 et K_2 . Pour les parcelles K_1 , la variation a été de 101,7 à 114,6 méq sur l'essai complexe et de 103,2 à 126,9 méq sur l'essai simple ; pour les parcelles K_2 , ces limites furent 100,5 à 117,4 méq et 97,3 à 124,9 méq.

Cependant S a reflété les anomalies de la nutrition sur les parcelles K_0 gravement déficientes. Les feuilles des parcelles K_0 ont des valeurs de S supérieures à la normale, comprises en moyenne entre 110 et 114 méq pour l'essai complexe de Pau et entre 101 et 141 méq pour l'essai simple. Les valeurs élevées de S , comprises entre 120 et 140 méq correspondent aux cas de déficience potassique grave et d'antagonisme $K - Mg$.

d) LES ÉQUILIBRES $K/Ca/Mg$.

La somme $S = K + Ca + Mg$ présentant pour l'échantillon foliaire considéré une variation relativement modérée et non désordonnée, il est intéressant d'étudier la qualité de la nutrition cationique au moyen du calcul des pourcentages de K , Ca , Mg au sein de la somme S supposée constante et égale à 100. Sur l'essai complexe de Pau, en 1956, on a enregistré cinq sortes d'équilibres qui recouvrent un grand nombre d'éventualités possibles dans la nutrition du maïs.

1) Parcelles K_0	équilibre	moyen	11	—	47	—	42
2) Parcelles $K_0 +$ fumier 1955	—	—	19	—	45	—	36
3) Parcelles K_1	—	—	36	—	38	—	26
4) Parcelles $K_1 +$ fumier 1955	—	—	40	—	37	—	23
5) Parcelles K_2 et $K_2 +$ fumier 1955	—	—	46	—	32	—	22

Le diagramme triangulaire de la figure 4 synthétise la nutrition $K/Ca/Mg$ du maïs en rapportant de nombreux équilibres $K/Ca/Mg$ allant de la carence potassique à la déficience magnésienne modérée.

Ces équilibres ne sont pas quelconques selon les conditions du milieu sol ou l'effet de la fumure. Au contraire, les équilibres possibles dans la feuille de premier rang au-dessous de l'épi se trouvent groupés dans une zone représentée en traits discontinus et qui peut se diviser en 5 parties.

La partie AB correspond aux équilibres où K représente moins de 20 p. 100, Mg de 35 à 48 p. 100 et où Ca est très peu dispersé entre 42 et 48 p. 100. Dans cette partie, la courbe d'ajustement est à peu près parallèle à l'axe xz , d'où la constance relative du pourcentage de Ca . C'est la zone de la déficience potassique aiguë, caractéristique des parcelles K_0 des essais considérés en l'absence de fumure organique. Il est peu probable que des équilibres de cette zone puissent se rencontrer en grande culture dans le sud-ouest de la France. Cette zone est par excellence celle de l'antagonisme $K - Mg$.

La partie BC correspond aux équilibres où K représente entre 20 et 30 p. 100. C'est une zone où il y a, à la fois, antagonisme $K - Mg$ et antagonisme $K - Ca$ et une liaison $Ca - Mg$. Des diagnostics compris dans cette zone peuvent se rencontrer assez fréquemment sur sables des Landes et sur bouldènes non fertilisées.

Remarquons que les valeurs du rapport $\frac{(Ca + Mg)}{K}$ (en méq) sont de C en A sous l'influence de Mg et K. Dès que l'antagonisme K — Mg joue avec intensité, le rapport croît très vite. Du point (30 — 45 — 25) au point (20 — 45 — 35), il passe de 2,33 à 4,0. Le point important dans l'étude du déséquilibre $\frac{(Ca + Mg)}{K}$ semble bien être dans la zone voisine de C.

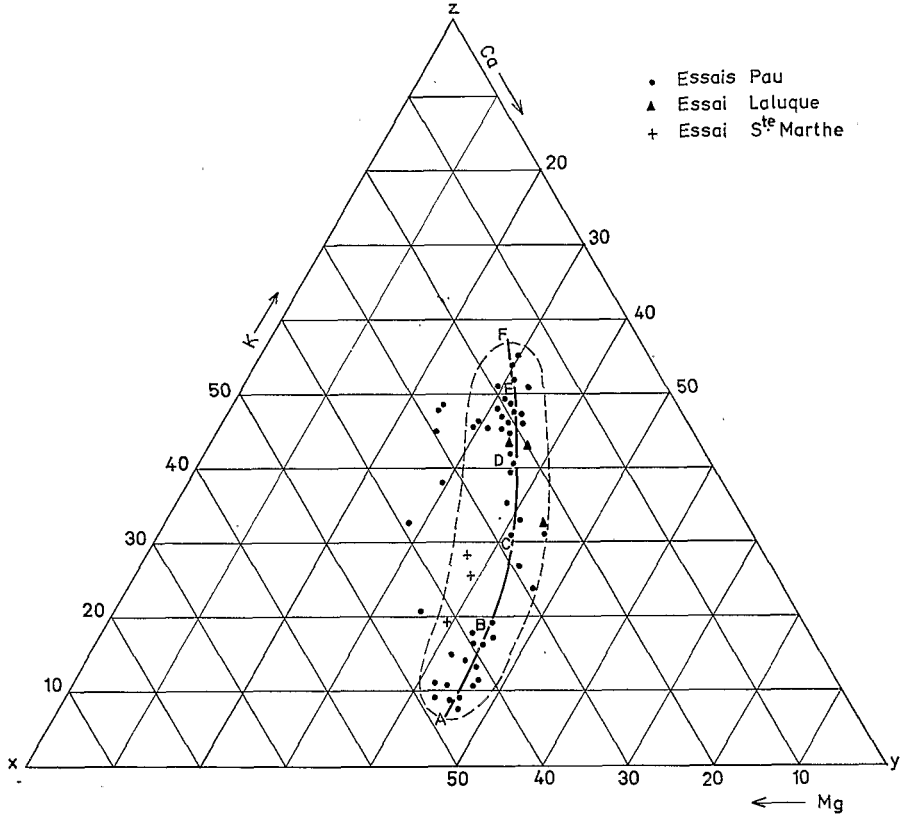


FIG. 4. — Équilibres K/Ca/Mg dans la feuille de l'épi

La partie CD correspond aux équilibres où K représente 30 à 40 p. 100 de S, Ca de 42 à 37 p. 100 et Mg de 28 à 24 p. 100. C'est la zone typique de déficience en potassium nette vers le point C, à modérée vers le point D.

Dans la partie CD, le pourcentage de K augmente surtout au détriment de Ca. C'est une zone d'antagonisme K — Ca marqué, d'antagonisme K — Mg nettement moins accusé.

La partie DE correspond aux équilibres où K représente de 40 à 50 p. 100 de S, Ca de 35 à 30 p. 100 et Mg de 24 à 20 p. 100. Théoriquement, cette zone est la plus favorable aux rendements en ce qui concerne la nutrition cationique. L'optimum lui-même pourrait correspondre à des équilibres compris entre 40 — 35 — 25 et 45 — 32 — 23.

La partie EF enfin correspond aux équilibres où K représente plus de 50 p. 100, Ca moins de 32 p. 100 et Mg plutôt moins de 20 p. 100.

Pour la partie DF la courbe d'ajustement est à peu près parallèle à l'axe yz ; aussi dans cette zone le pourcentage de Mg reste-t-il sensiblement constant. C'est principalement la zone des antagonismes K — Ca. Cependant au-delà de E apparaît le risque d'une déficience magnésienne au moins relative pour les équilibres où Mg représente moins de 18 p. 100.

e) RELATIONS ENTRE LES CONDITIONS DE SOLS ET LA NUTRITION CATIONIQUE DU MAÏS.

Les conditions de sols doivent intervenir directement sur la nutrition cationique du maïs et par suite sur les solutions à apporter au problème de la fumure potassique, et à celui des apports calco-magnésiens.

Les relations entre les conditions de sols et les rendements du Maïs en ce qui concerne la nutrition cationique mettent en cause les éléments suivants :

- teneurs en cations échangeables, K, Ca, Mg ;
- capacité d'échange et taux de saturation ;
- rapport Ca/K (exprimé en milliéquivalents).

Teneurs du sol en potassium échangeable.

Les corrélations entre les rendements du Maïs d'une part et les teneurs du sol en potassium échangeable et les apports d'engrais potassiques d'autre part, ont été étudiées surtout aux États-Unis.

BRAY (1944) a montré que la relation entre la teneur en K échangeable du sol et les accroissements de rendement du maïs par l'apport de K_2O n'était pas très nette (au moins pour des teneurs supérieures à environ 250 kg K_2O échangeable par hectare. Par contre, la teneur en potassium échangeable est en relation plus étroite avec les rendements obtenus sans apports potassiques exprimés en pourcentages des rendements obtenus lorsque le sol reçoit la meilleure dose de K_2O .

BRAY (1945) a montré ensuite que le besoin du Maïs serait de 400 kg K_2O échangeable par hectare ; cette valeur serait une constante pour le Maïs dans certaines limites et ne changerait pas d'une manière notable dans les conditions du Corn Belt.

LONG et SEATZ (1953) étudièrent les corrélations entre les réponses aux engrais potassiques et la teneur du sol en potassium assimilable pour 72 essais sur Maïs dans le Tennessee. Au-delà de 240 kg K_2O assimilable par hectare, il n'y eut pas de réponse aux engrais potassiques.

KRANTZ et CHANDLER (1951) ont étudié plusieurs niveaux de fumure potassique sur plusieurs types de sols ayant respectivement 0,10 — 0,16 — 0,23 — 0,28 méq K échangeable. Une réponse jusqu'au niveau d'apport de 120 kg K_2O ne fut enregistrée que pour les sols de 0,10 et 0,16 méq et jusqu'au niveau de 80 kg K_2O pour les sols à 0,28 méq K.

HUTTON, ROBERTSON et HANSON (1956) déterminèrent sur un essai comportant cinq niveaux de K_2O (0 — 17,5 — 35 — 70 — 140 kg K_2O /ha) la dose de potasse requise pour l'obtention du rendement maximum, dans les conditions de milieu de l'essai. Sur le sol présentant au départ 136 kg K_2O échangeable par hectare, onregistra un appauvrissement marqué par cinq maïs successifs (la teneur tombant à

100 kg K_2O éch.) ; une application annuelle de 70 kg K_2O était nécessaire pour maintenir le stock initial de potassium échangeable ; et avec une application de 140 kg K_2O l'enrichissement n'était pas considérable (172 kg K_2O éch.).

Il est difficile de comparer les données du Corn Belt à celles de France. En particulier les quantités de K_2O échangeable par hectare rapportées résultent du produit de K_2O échangeable déterminé sur échantillon par certains tests (utilisation de perchlorate de sodium comme réactif d'extraction) par une quantité de terre fixée aux États-Unis à 2 millions de livres à l'acre, soit environ 2 250 tonnes/hectare.

Les données de BRAY (1945) concernaient 22 sols ayant de 66 à 425 kg K_2O échangeable/hectare (soit environ 0,03 à 0,19 p. 1 000 en K_2O) et 22 rendements sans potasse allant de 13 à 64 q/ha, dont 8 rendements moyens inférieurs à 25 quintaux correspondaient à des sols ayant moins de 120 kg K_2O /hectare (moins de 0,06 p. 1 000).

A partir de l'ensemble de l'expérimentation citée (LOUÉ, 1961), de l'étude de la nutrition potassique de la feuille de l'épi, des données concernant K échangeable du sol (évolution sous cultures de Maïs, en présence de diverses doses de K_2O), on peut estimer dans le sud-ouest de la France, que les sols ayant moins de 0,22 méq K échangeable pour 100 g de sol (détermination par spectrophotométrie de flamme après extraction par l'acétate d'ammonium neutre) soit 0,10 p. 1 000 en K_2O (ou 225 kg K_2O échangeable/ha) (2 250 tonnes de terre) peuvent être considérés comme nettement pauvres à cet égard, et dans la zone de forte probabilité de réponse aux engrais potassiques. Rentrent en particulier dans cette catégorie les sols des Landes, les sols sur sables fauves, les boubènes des terrasses.

Les sols sableux des Landes présentent des teneurs en potasse échangeable qui vont de 0,03 à 0,20 p. 1 000 (K_2O), mais le plus souvent le taux est de 0,06 à 0,12 p. 1 000 (ou de 0,13 à 0,25 méq p. 100).

Sur les boubènes des terrasses de la Garonne, la teneur en potasse échangeable oscille entre 0,04 et 0,12 p. 1 000 (K_2O) soit 0,08 et 0,25 méq.

Sur tous ces types de sols, très importants pour la culture du Maïs dans le sud-ouest de la France, la teneur en potassium échangeable constitue un critère satisfaisant, malgré ses insuffisances.

Autres déterminations concernant le potassium.

Il se produit une libération progressive du potassium sous forme non échangeable qui permet de renouveler les disponibilités en K échangeable.

DE TURK, WOOD et BRAY (1943) signalent à cet égard que sur un sol de l'Illinois le taux de potassium échangeable diminue de 40 p. 100 de mai à octobre au cours d'une culture de Maïs, mais le niveau d'origine fut rétabli au mois de mai suivant.

Selon SCHMITZ et PRATT (1953) les quantités de K extraites par NO_3H fournissent un meilleur indice que la teneur en K échangeable pour estimer la réponse du Maïs aux fumures potassiques. Le meilleur indice de K absorbé dans les sols sans apport de potasse serait une régression multiple dans laquelle l'absorption de K est calculée en fonction de K échangeable au début de la culture et de K libéré des formes non échangeables par l'extraction par NO_3H N.

Pour une plante à croissance rapide comme le Maïs, la détermination du potassium échangeable peut être considérée comme relativement suffisante. La presque-totalité du prélèvement de K_2O s'opère en effet entre le 15 juin et le 15 août.

Il serait cependant intéressant d'évaluer l'aptitude des principaux types de sols à Maïs, à céder du potassium assimilable au cours de la culture, par des extractions successives, par CaCl_2 0,01 N par exemple, selon les récents travaux d'agronomes israéliens (HAGIN et *al.*, 1962).

SCOTT et WELCH (1961) ont montré récemment, par des expériences sur courtes périodes que le maïs absorbait des quantités de K fort variables de sols cependant identiques au départ en K échangeable.

Rapports K/Ca , $\frac{K}{(\text{Ca} + \text{Mg})}$, K/CE .

Mais sur de nombreux types de sols, la considération de la seule teneur en K échangeable est insuffisante pour rendre compte de la nutrition cationique du Maïs.

DE LONG et *al.* (1953) ont indiqué que le rapport Ca/K était un meilleur indice des niveaux potassiques foliaires du Maïs que la seule teneur en K échangeable. Le rapport Ca/K présente une corrélation négative hautement significative avec la teneur des feuilles en potassium.

PIERRE et BOWER (1943) ont montré qu'un rapport élevé $\frac{(\text{Ca} + \text{Mg})}{\text{K}}$ dans la solution du sol, cas fréquent dans l'État d'Iowa, peut être un facteur important de déficience potassique, en particulier sur Maïs.

En France, nous ne disposons pas d'études précises en ce sens sur maïs. Sur les terreforts au nord de la Garonne, par exemple, les teneurs en potasse échangeable sont très fluctuantes, de 0,10 à 0,50 p. 1000 (0,22 à 1,10 méq pour 100 g) avec un rapport Ca/K très élevé, souvent compris entre 50 et 75. Ici l'interprétation des besoins du Maïs en potasse doit faire intervenir non seulement K échangeable, mais aussi la capacité d'échange (CE). Pour les terreforts celle-ci est souvent comprise entre 20 et 25 méq pour 100 g avec un taux de potassium échangeable entre 0,30 et 0,40 méq pour 100 g.

Le potassium échangeable ne représente donc que de 1,2 à 2,0 p. 100 de la capacité d'échange.

Le rapport K/Ca est voisin du rapport K/CE et plutôt inférieur car le calcium échangeable dépasse généralement à lui seul la valeur de la capacité d'échange.

V. — CONCLUSION

On peut admettre que les données d'ordre physiologique complètent utilement les données purement expérimentales qui leur ont servi de base. Les doses de fumure potassique préconisées à partir des résultats expérimentaux (LOUÉ, 1961) sont étayées par les considérations sur la nutrition potassique basées sur le diagnostic chimique de la feuille de l'épi.

La meilleure fumure potassique doit en effet à la fois :

- 1) Procurer la plus haute rentabilité de la fumure ;
- 2) Contribuer au moins au maintien de la fertilité du sol, ce qui peut être apprécié par des dosages périodiques de K échangeable au cours de la rotation.
- 3) Conduire à la nutrition potassique la plus élevée, n'engendrant ni « Consommation de luxe » ni déséquilibres nutritifs.

La valeur de la méthode du diagnostic foliaire est évidemment la plus grande vers les basses teneurs foliaires en K (< 1,30 pour cent de matière sèche, seuil critique des conditions défavorables) et secondairement vers les fortes teneurs (> 2,00 p. 100 de matière sèche) en liaison avec les niveaux calciques et magnésiens.

Mais entre $K = 1,30$ p. 100 et $K = 2,00$ p. 100 on peut estimer qu'il y a intérêt à obtenir le plus haut niveau nutritif : si un supplément de x kg K_2O/ha à une dose X kg K_2O/ha provoque un accroissement significatif de la teneur de la feuille de l'épi en K, et si cette teneur est < 2,0 p. 100, on devrait avoir intérêt à appliquer la dose $(X + x)$.

En matière de nutrition cationique, le diagnostic chimique apparaît enfin, comme le complément nécessaire et vivant des déterminations relatives aux cations échangeables.

Reçu pour publication en septembre 1962

SUMMARY

CATIONIC NUTRITION OF MAIZE AND FOLIAR DIAGNOSIS

I. *Practical foliar diagnosis*

Samples for this study were taken from the leaf of the ear harvested at the commencement of male flowering from 60 plants from each of a series of plots, only the central one-third of the leaf being analysed. The samples were taken from various plots in the South-West of France on different types of soil which were part of an experiment on potash fertilizing at three levels of application : nil, 80 to 100 kg/ha, and 120 to 160 kg/ha of K_2O , according to the layout of the trial.

II. *Results*

Owing to the fact that the experiment had been running for several years, diagnoses of the plot differences vis-à-vis K, Ca and Mg were obtained.

Nitrogen and phosphorus nutrition being correct, the study was occupied with the relationship between yield and potassium nutrition. Yields varying from 10 to 85 quintals per hectare of grain were obtained with leaf potassium concentrations lying between 0.42 and 2.72 p. 100 of dry matter.

III. *Discussion*

Relationship between foliar K content and yield.

TYNER (1946) studying a range of K concentrations from 0.70 to 2.00 p. 100 of dry matter discovered a highly significant correlation and suggested a critical K concentration of 1.30 p. 100 for the 6th leaf of the flowering stalk. The range of foliar K concentration vis-à-vis yield studied in the current work was wider and showed that the relationship between them was a curvilinear one.

There was a zone of serious deficiency from 0.4 to 1.0 p. 100 approximately, where the correlation was very strong. For a second zone from 1.0 to 1.6 p. 100 the correlation remained distinct. Above 1.6 to 1.7 p. 100 results became marginal. A critical level (i. e. that level above which no distinct relationship was evident between foliar K content and crop yield) was suggested at 1.7 p. 100.

K/Ca/Mg equilibria.

The K deficient zone was the zone of K-Mg antagonism, and the zone of very high K concentrations that of K-Ca antagonism.

The percentages of K, Ca and Mg in relation to the sum of the cations (calculated in meq) in the leaf of the ear were reviewed. When K deficiency was very serious, there was an equilibrium of the type 10 — 45 — 45; when the deficiency was less serious; 20 — 45 — 35. Cationic nutrition was less disturbed as from 30 — 40 — 30. The optimum seemed to be between 40 — 35 — 25 and 45 — 32 — 23. When K increases above 50 p. 100 of the sum of the cations, an induced Mg deficiency may be expected.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDHARIA R. M., STANFORD G., SCHALLER F. W., 1953. Nitrogen status of Marshall Silt Loam as influenced by different crop rotations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 247-251.
- BENNETT F., STANFORD G., DUMENIL L., 1953. Nitrogen, phosphorus and potassium content of the corn leaf and grain as related to nitrogen fertilization and Yield. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 252-258.
- BOSWELL F. C., PARKS W. L., 1957. The effect of soil potassium levels on yield, lodging and mineral composition of Corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 301-305.
- BRAY R. H., 1944. Soil plant relations. I. The quantitative relation of exchangeable potassium to crop yields and to crop response to potash additions. *Soil Sci.*, **58**, 305-324.
- BRAY R. H., 1945. Soil plant relations. II. Balanced fertilizer use through soil tests for potassium and phosphorus. *Soil Sci.*, **60**, 463-473.
- CALMES J., 1959. Le potassium et le magnésium dans les limbes du maïs. *C. R. Acad. Sci.*, 292-294.
- COÏC Y., LESAINT C., LE ROUX F., 1961. Comparaison de l'influence de la nutrition nitrique et ammoniacale combinée ou non avec une déficience en acide phosphorique sur l'absorption et le métabolisme des anions-cations et plus particulièrement des acides organiques chez le Maïs. Comparaison du Maïs et de la Tomate. *Ann. Physiol. Veg.*, **3**, 141-163.
- COPE J. T., BRADFIELD R., PEECH M., 1953. Effect of sodium fertilization on yield and cation content of some field crops. *Soil Sci.*, **76**, 65-74.
- DE LONG W. A., MAC KAY D. C., STEPLER H. A., 1953. Coordinated soil plant analysis. I. Nutrient cations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 262-266.
- DULAC J., 1955. Diagnostic foliaire des céréales. III. Application de la relation azote-rendement au Maïs. IV. Relation entre la teneur en azote de la feuille de l'épi, le rendement à l'hectare, le rendement par pied et la densité chez le Maïs. *C. R. Acad. Agric.*, 500-507.
- DUMENIL L., 1961. Nitrogen and phosphorus composition of corn leaves and Corn yields in relation to critical levels and nutrient balance. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 295-298.
- ELLIS B. G., KNAUSS C. J., SMITH F. W., 1956. Nutrient content of Corn as related to fertilizer application and soil fertility. *Agron. J.*, **48**, 455-459.
- FOY C. D., BARBER S. A., 1958. Magnesium absorption and utilization by two inbred lines of Corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 57-62.
- FOY C. D., BARBER S. A., 1958. Magnesium deficiency and corn yield on two acid Indiana soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 145-148.
- GOODALL D. W., GREGORY F. C., 1947. Chemical composition of plants as an index of their nutritional status. *Imp. Bur. Hort. Plant crops.*
- HAGIN J., FEIGENBAUM S., 1962. Estimation of available potassium reserves in soils. *Intern. Potash Inst.*, 7th Congress, 9 p. (sous presse).
- HOFFER G. N., 1930. Testing corn stalks chemically to aid in determining their plant food need. *Bull. Ind. Agric. Exp. Sta., Bull. Exp. Sta. Univ. Purdue.*
- HUTTON C. E., ROBERTSON W. K., HANSON W. D., 1956. Crop response to different soil fertility levels in a 5 by 5 by 5 by 2 factorial experiment. I. Corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 531-537.
- JONES J. P., 1929. Deficiency of magnesium, the cause of a chlorosis in Corn. *J. Agric. Res.*, **39**, 873-892.
- KRANTZ B. A., CHANDLER W. V., 1951. Lodging, leaf composition, and yield of Corn as Influenced by heavy applications of nitrogen and potash. *Agron. J.*, **43**, 547-552.
- LARSON W. E., PIERRE W. H., 1953. Interaction of sodium and potassium on yield and cation composition of selected crops. *Soil Sci.*, **76**, 51-64.
- LONG O. H., SEATZ L. F., 1953. Correlation of soil tests for available phosphorus and potassium with crop yield responses to fertilization. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 258-262.
- LOUÉ A., 1961. La fumure potassique et la nutrition minérale du Maïs. *Sté Comm. Potasses Alsace, Bull. Sp.*, 113 p.
- LOUÉ A., 1962. Quelques aspects de nutrition minérale comparée de diverses variétés de maïs hybrides. Rapp. non publié.
- MELSTED S. W., 1953. Some observed calcium deficiencies in corn under field conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 52-54.
- NELSON L. B., 1956. The mineral nutrition of Corn as related to its growth and culture. *Advances Agron.*, **8**, 321-375.
- PIERRE W. H., BOWER C. A., 1943. Potassium absorption by plants as affected by cationic relationships. *Soil. Sci.*, **55**, 23-36.
- SAYRE J. D., 1948. Mineral accumulation in Corn. *Plant. Physiol.*, **23**, 267-281.
- SAYRE J. D., 1955. Mineral nutrition of Corn. in « Corn and Corn improvement ». *Amer. Soc. Agron.*, **5**, 293-314.

- SCHMITZ G. W., PRATT P. F., 1953. Exchangeable and nonexchangeable potassium as indexes to yield increases and potassium absorption by Corn in the greenhouse. *Soil Sci.*, **76**, 345-353.
- SCOTT A., WELCH L. F., 1961. Release of nonexchangeable soil potassium during short periods of cropping and sodium tetraphenylboron extraction. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 128-132.
- SOUBIES L., GADET R., LENAIN M., 1956. Une difficulté particulière à la fertilisation azotée du Maïs et le moyen d'y remédier. *C. R. Acad. Agric.*, **42**, 246-250.
- STANFORD G., KELLY J. B., PIERRE W. H., 1942. Cation balance in corn grown on high lime soils in relation to potassium deficiency. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, **6**, 335-341.
- THOMAS W., 1938. Foliar diagnosis. Mathematical expression of equilibrium between lime, magnesia and potash in plants. *Science (N-S)*, **88**, 222-23.
- THOMAS W., MACK W. B., 1939. The foliar diagnosis of *Zea mays* subjected to differential fertilizer treatment. *J. Agric. Res.*, **58**, 477-491.
- THOMAS W., MACK W. B., 1939. Foliar diagnosis : physiological balance between the bases lime, magnesia and potash. *Plant Physiol.*, **14**, 699-715.
- THOMAS W., MACK W. B., 1939. A foliar diagnosis study of the effect of three nitrogen carriers on the nutrition of *Zea mays*. *J. Agric. Res.*, **59**, 303-313.
- THOMAS W., MACK W. B., 1943. Foliar diagnosis in relation to plant nutrition under different conditions of weather and soil reaction. *Soil Sci.*, **56**, 197-212.
- TRUOG E., BERGER K. C., ATTOE O. J., 1953. Response of nine economic plants to fertilization with sodium. *Soil Sci.*, **76**, 41-50.
- TURK DE E. E., WOOD L. K., BRAY R. H., 1943. Potash fixation in Corn Belt soils. *Soil Sci.*, **55**, 1-12.
- TYNER E. H., 1946. The relation of corn yields to leaf nitrogen phosphorus and potassium content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 317-323.
- TYNER E. H., WEBB J. W., 1946. The relation of corn yields to nutrient balance as revealed by leaf analysis. *J. Amer. Soc. Agron.*, **38**, 173-185.
- VIETS F. G., NELSON C. E., CRAWFORD C. L., 1954. The relationships among corn yields, leaf composition and fertilizers applied. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **18**, 297-301.
- WITTELS H., SEATZ L. F., 1953. Effect of potash fertilization on yield, stalk breakage and mineral composition of corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 369-371.

Ann. Physiol. vég., 1962, 4 (2), 127-148.

LA NUTRITION CATIONIQUE DU MAÏS ET LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE

A. LOUÉ

Service agronomique des Potasses d'Alsace, Mulhouse (Haut-Rhin)

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 28314, ex 1

Cpte : B