

nov. 1969

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n°.

FERTILISATION MINERALE DU MAIS

II - Diagnostic foliaire du maïs

Par

A. LOUE,

Ingénieur agronome - Directeur de Recherches à
 l'O.R.S.T.O.M. En service détaché aux Services Agronomiques
 de la Société Commerciale des Potasses d'Alsace.

METHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC FOLIAIRE DU MAIS

La méthode fut inaugurée sur le maïs par Thomas, aux Etats-Unis en 1938 (21) puis poursuivie par Thomas et ses collaborateurs en 1939, 1943, 1944 (22-22-24-25). La feuille échantillonnée était alors la 3^{ème} ou la 4^{ème} feuille à partir de la base.

Puis ces études se sont développées, surtout aux Etats-Unis. En 1946, Tyner opère sur la sixième 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 identiques, 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 plus typiques, car c'est la période critique pour toutes les variétés.

Ce mode de prélèvement fut également utilisé en 1953 par Bennett, Stanford, Dumenil, qui récoltaient cependant 20 feuilles par parcelle expérimentale (3).

En France, le diagnostic foliaire du maïs a été abordé dans la période récente, notamment par Dulac 1955 (7).

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.- début de la floraison mâle (émission du pollen)
- 2.- début dessiccation des soies (stigmates),
- 3.- quinze jours plus tard,
- 4.- début du jaunissement des spathes.

Ensuite ces problèmes furent repris en détail par les agronomes de l'azote (10-20) et la nutrition cationique fut plus particulièrement étudiée par Loué (13 - 14 - 15 - 16).

Les points les plus importants de la méthode du diagnostic foliaire du maïs semblent maintenant bien établis. On note d'ailleurs une bonne concordance entre la méthode ici décrite (17) et celle préconisée par O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 22-429

Cote : B

Chapman (page 740) à partir des principales références bibliographiques (Reichman et al (1959), Freitas et al (1960), Krantz et Chandler (1951), Dowdy et al (1958), Dumenil (1961), Loué (1962), Grunes et al (1961), Teater et al (1960), Mackay et Leefe (1962), Hanway (1962), Baird et al (1962), Tyner (1947).

La période de prélèvement

Les prélèvements avant la floraison sont à rejeter.

Pour l'azote et le potassium, les prélèvements aux stades 1 et 2 ci-dessus fournissent les meilleures liaisons teneurs \times rendements.

Pour le phosphore le stade 1 serait légèrement meilleur que le stade 2.

En ce qui concerne les cations K, Ca, Mg, le diagnostic pratiqué seulement au stade 1 serait insuffisant et devrait être complété par un second prélèvement à la dessiccation des soies.

L'utilisation pratique de la méthode du diagnostic foliaire, c'est-à-dire le contrôle de très nombreuses parcelles expérimentales ou champs de maïs, fait qu'en général une seule date de prélèvement est retenue, le stade 1. Mais lorsqu'on poursuit un but de recherche et non de simple diagnostic de prospection, il est préférable d'effectuer un second prélèvement au stade 2, et l'on peut, soit utiliser les deux données séparément, soit les grouper.

L'importance de l'échantillonnage des plants de maïs à un stade bien déterminé de la croissance est fondamentale en matière de diagnostic foliaire. La description des stades de croissance du maïs donnée par Hanway (11) devrait permettre de comparer les résultats obtenus par des auteurs opérant à des stades légèrement différents.

Le rang de la feuille à prélever

Certains auteurs prélèvent la feuille du premier ou du second nœud sous l'épi, mais le prélèvement le plus pratiqué concerne la feuille de l'épi.

Cependant, on ne retient jamais les feuilles situées au-dessus de l'épi car leur composition s'est révélée beaucoup moins sensible aux variations de nutrition minérale.

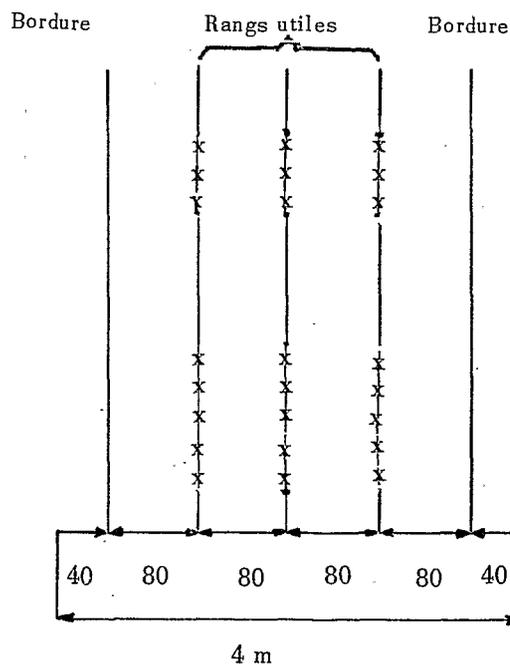
La comparaison des résultats obtenus par des auteurs prélevant des feuilles de rang différent est malaisée, surtout lorsqu'il y a 2 rangs d'écart (feuille de l'épi et du second entrenœud sous l'épi).

Dans les études ici poursuivies, les prélèvements concernaient toujours la feuille de l'épi et on ne conservait que le tiers central de la feuille, la nervure étant éliminée (opération facilement réalisable au champ).

Importance quantitative de l'échantillon

Le diagnostic foliaire est généralement pratiqué sur des parcelles expérimentales et dans ce cas nous conseillons d'échantillonner au moins 50 plantes par parcelle. Dans la plupart des essais factoriels, la parcelle élémentaire a une surface allant de 1 à 2 ares. Dans le cas d'une parcelle de $4 \times 25 \text{ m} = 1 \text{ are}$, les lignes étant écartées de 0,80 m, on prélèvera par exemple 20 feuilles sur chacun des 3 rangs utiles, soit 60 feuilles par parcelle

Lorsque le diagnostic foliaire est effectué dans un champ non expérimental, il est bon d'échantillonner séparément les zones pouvant différer par quelque facteur tel que variété, densité de plantation, date de semis, façons culturales, irrigation ou non, type de sol, nature de la fumure, etc... et de prélever de 50 à 100 feuilles par zone considérée. Dans ce cas, on a, en général, affaire à



des parcelles de plus grandes dimensions que les parcelles expérimentales et les 100 feuilles peuvent être prises sur une ou deux lignes mais aussi sur une diagonale ou deux diagonales en croix.

LES RESULTATS OBTENUS PAR LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE

La comparaison des résultats obtenus par les différents auteurs nécessite au moins la similitude des modes d'échantillonnage, les normes d'interprétation des gammes de teneurs n'étant rigoureusement valables que dans les conditions où elles ont été obtenues.

Le but des recherches de diagnostic foliaire est d'abord l'obtention de corrélations entre les rendements et les teneurs foliaires en N, P, K, permettant la détermination de niveaux critiques, de zones de déficience, grave déficience; c'est ensuite l'étude des rapports des éléments entre eux. Il est en réalité très délicat de tenter d'exprimer le rendement en fonction de la teneur en un élément, sous forme d'une régression simple en raison des liaisons entre éléments. C'est particulièrement vrai pour le groupe des cations K, Ca, Mg, pour lequel existe une liaison négative forte K-Mg, une liaison négative moins catégorique K-Ca et une liaison positive assez modérée Ca-Mg.

Le concept de niveau critique conserve une importance pratique fondamentale en matière de diagnostic foliaire du maïs. Tyner l'avait défini comme la teneur minimum requise pour le maximum de croissance. Bennett et al. définirent les niveaux critiques comme les teneurs correspondant à 95 % du rendement maximum. Selon Macy le niveau critique d'un élément devait être largement indépendant des niveaux des autres éléments (18). Pour Ulrich l'influence reconnue certaine des autres facteurs ne doit cependant pas perturber grandement l'interprétation des niveaux critiques dans les conditions au champ (28). Par la suite il fut reconnu que les seuils critiques devaient être influencés par les niveaux des autres éléments. En fait, depuis plusieurs années, l'analyse de la régression multiple est de plus en plus employée pour étudier les relations entre le rendement et les teneurs de la feuille en deux éléments.

La nutrition anionique du maïs et le diagnostic foliaire :

a.- Les niveaux azotés

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

Tyner (1946) (26, 27), Bennett et al. (1953) (3), Andharia et al. (1), Viets et al. (1954), Dulac (7), Soubies (20), Dumenil (8), Baird et al (2) 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 a proposé comme niveau critique (au-dessus duquel la réponse à l'azote serait douteuse et faible) 3,10 %.

Bennett et al. ont montré que la teneur critique peut varier à l'intérieur d'une zone assez étroite (2,8 à 3,00 %)

Viets et al. ont trouvé de leur côté 2,83 % pour niveau critique et 2,20 % 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 2,30 à 3,50 %.

Fourcassié a étudié la relation entre les taux d'azote de la feuille de l'épi et ceux de la feuille de niveau immédiatement inférieur (10).

Chez le maïs, l'azote contrôle le développement et les majorations de rendements à attendre de l'usage des engrais phosphatés et potassiques. En particulier, pour apprécier les niveaux potassiques foliaires en liaison avec les rendements, il est nécessaire de se placer à l'optimum de nutrition azotée.

a.- Les niveaux phosphorés

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

C'est surtout pour N et P que la régression multiple a été employée. Dumenil, en particulier, étudia la relation entre les rendements et les teneurs en N et P des feuilles de maïs à partir de très nombreux essais (8). Des rendements identiques étaient obtenus avec des niveaux en N et P variables dans certaines limites. Les teneurs en N (et P) de la feuille, pour un rendement correspondant à 95 % du rendement maximum, variaient avec la concentration de l'autre élément, pour un rendement de leur interaction significative sur le rendement. Ainsi dans cette étude, le rendement de 95 % peut être obtenu avec 2,81 à 3,22 % N tandis que le pourcentage de P passe de 0,334 à 0,288 % (Fig. 1)

Par suite, le niveau critique de N ou P ne serait pas un point ni même une zone très étroite de valeurs, mais une gamme assez étendue de teneurs dépendant du niveau de l'autre élément dans la feuille. Le concept habituel de niveau critique serait dès lors un cas particulier : le niveau critique devient en effet un point bien défini, ou une zone étroite de teneurs, seulement très près du maximum de rendement, et lorsque tous les autres facteurs sont présents aux niveaux permettant précisément l'obtention du maximum de rendement.

La nutrition cationique du maïs et le diagnostic foliaire :

a.- Les niveaux potassiques

Les études sur la nutrition potassique du maïs en fonction des niveaux foliaires sont peu nombreuses.

Tyner, étudiant une gamme de teneurs allant de 0,7 à 2,0 % a trouvé une corrélation hautement significative et proposé une concentration critique en K, de la sixième feuille à la floraison, de 1,30 % 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 (26).

Krantz et Chandler en 1951 observèrent une liaison étroite entre les teneurs des feuilles en potassium et les apports allant de 0 à 320 kg K₂O/hectare sur des sols diversement dotés en K échangeable (12).

Ellis et al., en 1956, associèrent les teneurs foliaires inférieures à 1,30 % K aux sols présentant moins de 200 livres par acre de potasse échangeable (soit 0,10 % de sol) et notèrent que l'application de 90 kg K₂O par hectare à de tels sols amenait les teneurs au-dessus du seuil critique de Tyner (9).

Loué, étudiant plus particulièrement la nutrition cationique du maïs a procédé à une approche plus précise des niveaux potassiques (13 - 15). L'examen de la figure 2 suggère que la relation entre les rendements et les teneurs potassiques foliaires n'est pas linéaire, mais curvi-linéaire.

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

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

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

En fait, il est très difficile d'indiquer une teneur précise qui serait un véritable niveau critique. En ce qui concerne le potassium, en effet, cation d'absorption préférentielle, il est général qu'au-delà de certaines teneurs, tout calcul de liaison rendements × teneurs deviendrait illusoire. Il serait préférable d'indiquer une zone critique, de 1,7 à 2,0 % par exemple.

Pour les teneurs supérieures à 2,0 % environ, il y aurait consommation indifférente. A partir de cette zone, il conviendrait de considérer surtout l'équilibre des trois cations majeurs.

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. Au cours d'une année de grave sécheresse (1961), le seuil critique se serait situé vers 1,30 % 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 % ; dans les cas de déficiences hydriques, elle peut tomber vers 1,30 à 1,40 % ; dans les bonnes conditions, elle serait de 1,60 à 1,80 %.

La notion de niveau critique de teneur en K, si elle ne semble pas tout à fait rigoureuse en vue de la détermination de la fumure potassique, reste cependant très utilisable comme terme de référence. L'examen des niveaux potassiques foliaires enregistrés en fonction des doses de K₂O appliquées sur un type de sol donné fournit des indications précises.

b - Les niveaux calciques et magnésiens

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

Sur la plupart des essais étudiés, on a enregistré des corrélations négatives élevées entre les teneurs en K et celles en Ca et Mg.

Sur la figure 3 ont été représentées les teneurs en Ca et Mg en fonction des teneurs en K (données issues de nombreux essais). En considérant les courbes approchées, on constate facilement que la zone de déficit 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 forte corrélation positive entre Ca et Mg qui décroissent avec K croissant.

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.

En ce qui concerne le calcium, sur aucun des essais suivis les teneurs foliaires ne sont tombées dans la zone de déficience typique.

Pour le magnésium, la teneur a pu descendre assez bas. La plus basse teneur parcellaire enregistrée (0,16 % Mg) sur de nombreux essais est voisine de la zone d'apparition des signes (les teneurs associées aux symptômes nets sont inférieures à 0,10 % pour la feuille au-dessous de l'épi).

UTILISATION DU DIAGNOSTIC FOLIAIRE DANS LA FERTILISATION DU MAÏS

Les recherches sur le diagnostic foliaire ont grandement contribué aux connaissances en matière de fertilisation du maïs. Les applications de l'analyse foliaire sont nombreuses :

1.- Caractéristiques de nutrition selon les types de sols :

Les liaisons entre le rendement du maïs et le diagnostic foliaire sont généralement meilleures que les liaisons entre rendements et caractéristiques chimiques des sols. La principale utilisation du diagnostic foliaire est sans doute la connaissance de la nutrition du maïs à partir d'essais factoriels réalisés sur les principaux types de sols d'une région de culture du maïs.

2.- Caractéristiques de nutrition selon les techniques culturales :

Le diagnostic foliaire peut également servir à des études de nutrition minérale comparée de variétés de maïs, de techniques culturales telles que doses d'irrigation, densité de plantation, etc...

Il faut reconnaître qu'en ce qui concerne la comparaison variétale, lorsqu'il s'agit de variété appartenant à un même groupe de tardivité, le diagnostic foliaire ne nous a pas fourni de différences interprétables. La comparaison dans ce cas doit plutôt porter sur la production de matière sèche et les prélèvements.

3.- Étude des interactions et des équilibres entre éléments :

Si le diagnostic foliaire, en l'état actuel des connaissances, ne permet pas d'approfondir les mécanismes eux-mêmes d'action des ions, du moins permet-il d'étudier les liaisons entre les divers éléments. Les connaissances iront se précisant et les interventions en matière de fertilisation seront de mieux en mieux calculées.

4.- Dépistage des déficiences marquées :

En l'absence de la manifestation de signes caractéristiques des déficiences minérales, ou en présence de signes non caractéristiques, le diagnostic foliaire est une méthode très utile. En effet, la valeur de la méthode est la plus grande vers les basses teneurs foliaires en N, P, K...

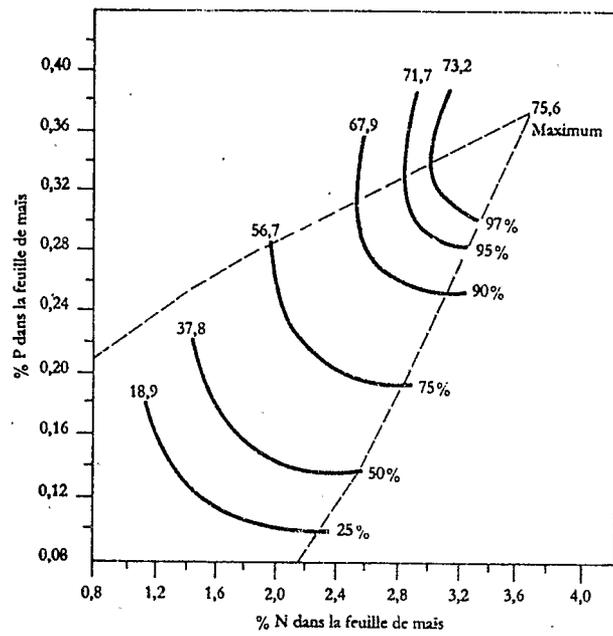


Fig. 1 (selon Dumenil). Courbes de rendements égaux pour 25, 50, 75, 90, 95, 97% du rendement maximum, soit 18,9, 37,8, 56,7, 67,9, 71,7, 73,2 quintaux/hectare respectivement, montrant les teneurs en N et P dans la feuille de maïs pour les rendements indiqués. (Les extrémités des courbes correspondent aux limites d'observations).

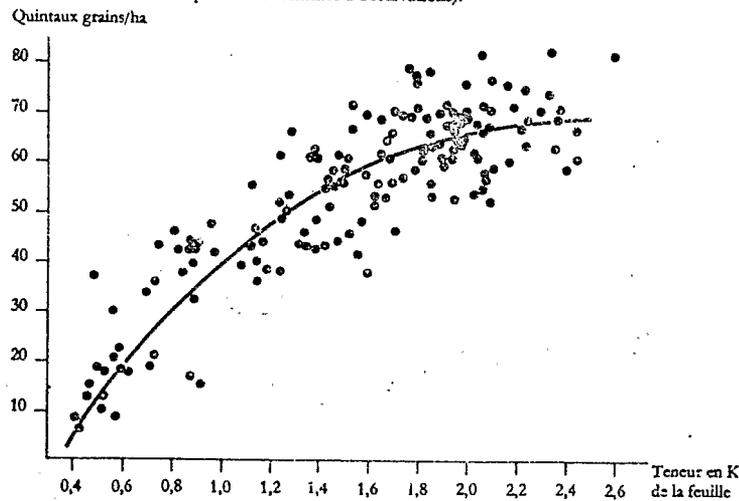


Fig. 2. Relation entre les rendements en grains (15% humidité) et la teneur en K de la feuille au-dessous de l'épi à la floraison.

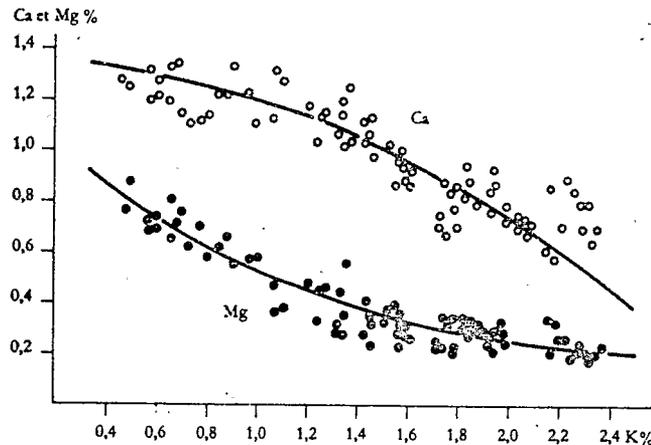


Fig. 3. Evolution des % de Ca et de Mg en fonction du % de K.

Diagnostic foliaire et méthodes voisines de contrôle de la nutrition minérale

- 1 - 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
- 2 - BAIRD BL, JW FITTS, DD MASON 1962 - The relationship of nitrogen in corn leaves to yield-Soil. Sci. Soc. Amer. 26 : 378-381
- 3 - BENNER WF, G. STANFORD, L. DUMENIL 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
- 4 - CALMES (J.) 1959 - Le - Le potassium et le magnésium dans les limbes du maïs - C.R.Ac. Sci. Paris -292-294
- 5 - CALMES (J.) 1965 - - Contribution à l'interprétation du diagnostic foliaire chez le maïs - C.R. Acad. Agric. France n° 18 p 1178-1183
- 6 - CHAPMAN - Diagnostic criteria for Plants and Soils 1966
- 7 - 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. ac. Agric. Fr. - 500-507
- 8 - 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
- 9 - ELLIS B.G., C.J. KNAUSS, F.W. SMITH 1956 - Nutrient content of corn, as related to fertilizer application and soil fertility. Agron. Jour. 48 : 455-459.
- 10 - FOURCASSIE (F.) 1964 - Diagnostic foliaire du maïs : réflexion sur la méthodologie, application aux champs d'essais de fertilisation - Colloque Européen sur le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation.
- 11 - HANNY (JJ) 1963 - Growth stages of Corn Agro - Jal 55: N° 5 - 487-491
- 12 - KRANTZ B.A. W.V. CHANDLER 1951 - Lodging, leaf composition and yield of corn as influenced by heavy applications of nitrogen and potash. Agron. Jour 43 : 547-552
- 13 - LOUE A. 1962 - La Nutrition cationique du maïs et le diagnostic foliaire-Ann. Physiol. Vegetale (Paris) 4 : 127-148
- 14 - LCUE A. 1963 - Maize nutrition, cation requirements and potash demand-World Crops n° 15 - 373-379
- 15 - LCUE A. 1963 - Contribution à l'étude de la nutrition cationique et plus particulièrement potassique du Maïs - Fertilité 20, 57 p.
- 16 - LOUE A. 1964 - Nouvelle observations sur la nutrition cationique du Maïs à partir d'un essai $K \times Ca \times Mg, 3 \times 3 \times 3$, sur sol particulièrement pauvre en bases échangeables. Colloque Européen sur le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation.

- 17 - LOUE A. 1965 - Le diagnostic foliaire du maïs (méthodologie, état actuel des connaissances, utilisation) 105-116 Inst. Intern. Potasse 1965. 4ème colloque régional (Belgrade).
- 18 - MACY (P.) 1936 - The quantitative mineral nutrient requirements of Plants - Plant Physiol. 11 - 749-764.
- 19 - MALAVOLTA E., EP GOMES 1961 - Foliar diagnosis in Brazil in : Plant analysis and fertilizer problems (p 180-189) W. Reuther, Ed. Publ. by. Amer. Inst. Biol. Sci. Washington - DC.
- 20 - SOUBIES (L.), GADET (R.), LENAIN (M.) 1956 - Une difficulté particulière à la fertilisation azotée du maïs et le moyen d'y remédier. Ac. Agric. 42 - 246-250
- 21 - THOMAS (W.) 1938 - Foliar diagnosis - Mathematical expression of equilibrium between lime, magnesia and potash in plants - Science (N.S) 88 - 222-3
- 22 - THOMAS (W.), MACK (W.B.) - The foliar diagnostics of Zea mays subjected to differential fertilizer treatment - Jal. Agric. Res. 58 - 477-491
- 23 - THOMAS (W.), MACK (W.B.) - 1938 - Foliar diagnosis : physiological balance between the bases lime, magnesia and potash - Plant Physiol. - 14 - 699-715.
- 24 - THOMAS (W.), MACK (W.B.) - 1939 - A foliar diagnosis study of the effect of three nitrogen carriers on the nutrition of Zea mays - Jal. Agric. Res. - 59 - 197-313
- 25 - 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
- 26 - TYNER E.H. 1947 - The relation of corn yields to leaf nitrogen, phosphorus and potassium content. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. (1946) 11 : 317-323
- 27 - TYNER E.H., JR WEBB 1946 - The relation of corn yields to nutrient balance, as revealed by leaf analysis. Journ. Amer. Soc. Agron. 38 - 207-228
- 28 - ULRICH (A.) 1952 - Physiological bases for assessing the nutritional requirements of Plants - Ann. Rev. of Plant Physiol. 3 207-228
- 29 - VIETS FG, CE NELSON, CL, CRAWFORD 1954 - The relationship among corn yields, leaf composition, and fertilizer applied. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 18 : 297-301