



HAL
open science

Appréciation de l'alimentation en zinc du maïs par la détermination du rapport Fe/Zn dans les parties aériennes du végétal

E. Lubet, Jean-Pierre Soyer, Christian Juste

► To cite this version:

E. Lubet, Jean-Pierre Soyer, Christian Juste. Appréciation de l'alimentation en zinc du maïs par la détermination du rapport Fe/Zn dans les parties aériennes du végétal. *Agronomie*, 1983, 3 (1), pp.45-50. hal-02728848

HAL Id: hal-02728848

<https://hal.inrae.fr/hal-02728848>

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Appréciation de l'alimentation en zinc du maïs par la détermination du rapport Fe/Zn dans les parties aériennes du végétal

Edmond LUBET, Jean-Pierre SOYER & Christian JUSTE

I.N.R.A., Station d'Agronomie, Centre de Recherches de Bordeaux, F 33140 Pont-de-la-Maye

RÉSUMÉ

*Maïs,
Alimentation minérale,
Zinc,
Fer,
Carence en zinc.*

On a mesuré de 1972 à 1981 le rapport Fe/Zn dans les parties aériennes de maïs atteints ou non de carence en zinc. Les échantillons ont été prélevés, à deux stades de végétation, soit dans des dispositifs expérimentaux de plein champ, soit dans des cultures où se manifestait la carence.

Le rapport Fe/Zn apparaît comme beaucoup plus discriminant que la seule détermination de la teneur en zinc pour la prévision de la carence zincique chez les plantes qui se développent en sols non calcaires : la valeur critique de ce rapport, au-delà de laquelle la déficience est hautement probable pour ce type de sols, a pu être estimée à 24 pour la population étudiée.

Dans le cas de plantes provenant de sols calcaires, la carence en zinc peut être fortement suspectée pour des rapports Fe/Zn supérieurs à 12, associés à des teneurs en zinc inférieures à 16 ppm.

SUMMARY

*Maize,
Mineral nutrition,
Zinc,
Iron,
Zinc deficiency.*

Utilization of the tissue Fe/Zn ratio for estimation of the Zn nutrition level in maize plants

From 1972 to 1981, Fe/Zn ratios were measured in the aerial parts of Zn-deficient or non-deficient maize plants. The plants were sampled at different stages of development in field experiments or in crops with signs of Zn deficiency.

The tissue Fe/Zn ratio appeared to be a better criterion for predicting zinc deficiency in maize than the determination of zinc alone in plants originating from non-calcareous soils. Fe/Zn ratios greater than 24 were related to a strong probability of Zn deficiency.

Plants originating from calcareous soils, Fe/Zn ratios higher than 12, associated with critical Zn levels of 16 ppm, indicated a very probable response to applied Zn.

I. INTRODUCTION

La carence en zinc est l'une des carences en oligo-éléments la plus fréquemment observée encore de nos jours sur maïs. Les symptômes, qui se manifestent à partir du déroulement de la 5^{ème} feuille, s'observent dans le Sud-Ouest sur des sols à structure dégradée, initialement acides, où des surchaulages ont été effectués. On les observe aussi parfois en sols calcaires. La carence se développe plus intensément au cours des printemps froids et humides.

Les nombreux travaux réalisés concernant ce trouble de la nutrition, notamment en France (DARTIGUES *et al.*, 1963 ; DARTIGUES, 1964, 1970 ; DARTIGUES & LUBET, 1967, 1968) ont fait progresser sensiblement la connaissance du déterminisme de la maladie, de sa symptomatologie et des moyens de sa correction. Des progrès restent cependant à faire dans le domaine de la prévision des états de carence ou de subcarence, prévision qui pourrait permettre la mise en œuvre de traitements préventifs (pulvérisations de produits zinciques) avant que n'apparaissent les symptômes ou ne chutent les rendements.

Les moyens utilisables pour réaliser cette prévision sont l'analyse du sol ou le diagnostic foliaire.

Pour ce qui concerne l'analyse du sol, il est connu de longue date (MASSEY, 1957) que la détermination du zinc total ne présente aucun intérêt. Par contre, l'évaluation des formes du métal dites mobiles ou assimilables extraites du sol par des réactifs faiblement agressifs (acides minéraux ou organiques dilués, agents complexants type EDTA ou DTPA) a été prônée par de nombreux auteurs. C'est ainsi qu'associé à la mesure du pH, l'emploi de HCl 0.2 N (DARTIGUES & LUBET, 1967) a été proposé pour la prévision des risques de carence en zinc dans les sols non calcaires du Sud-Ouest atlantique : ces risques paraissent hautement probables quand la quantité de zinc ainsi extraite est inférieure à 3 ppm et associée à un pH du sol supérieur à 6.4. En fait, l'expérience montre qu'il existe de nombreux exemples de cultures indemnes de déficience qui se développent sur des sols possédant des teneurs en Zn nettement inférieures à ce seuil critique ; cette observation, à laquelle vient s'ajouter la difficulté d'adaptation de la méthode aux sols calcaires, rend sa généralisation très hasardeuse. Le test

mettant en œuvre le DTPA, mis au point par LINDSAY (1972) et récemment modifié par HAVLIN & SOLTANPOUR (1981), est applicable à une plus large gamme de sols mais les très faibles quantités de zinc extraites par ce réactif (seuil de carence de 0.5 à 0.9 ppm), à la limite inférieure des plages de mesure des appareils couramment employés dans la plupart des laboratoires de routine, en font une méthode d'utilisation délicate. Cette difficulté est encore aggravée par l'échantillonnage rigoureux exigé par ce type particulier d'analyse (KENNEDY & BROWN, 1981).

Le diagnostic foliaire pose également de gros problèmes en raison des très faibles écarts qui séparent généralement les teneurs en zinc des maïs carencés de celles des plantes saines. Par exemple, DARTIGUES *et al.* (1963) observent des déficiences sévères chez des plantes dont les parties aériennes contiennent 11 ppm de zinc, alors que des plantes situées à proximité et guéries de la carence par des applications de sulfate de zinc au sol en contiennent 12 à 13.5 ppm. De même, MASSEY (1957) et HIATT & MASSEY (1958) observent des carences prononcées pour des teneurs de 14 ppm alors qu'à 16 et 17 ppm les signes de déficience sont inexistantes. Ces faibles écarts existant entre plantes saines et plantes malades, écarts de l'ordre de grandeur des erreurs analytiques possibles, condamnent pratiquement l'analyse foliaire limitée au seul dosage du zinc pour le diagnostic ou la prévision de la carence en cet élément.

Il existe, par contre, un très grand nombre de travaux faisant état de l'existence d'interactions notables entre alimentation en phosphore et en zinc et, surtout, entre alimentation en fer et en zinc chez le maïs et quelques autres espèces. Ce type d'interaction se traduit par une accumulation souvent spectaculaire du fer dans les tissus des végétaux atteints de déficience en zinc (DARTIGUES *et al.*, 1963; JACKSON *et al.*, 1967; AMBLER & BROWN, 1969; WARBNOCK, 1970); il en résulte une augmentation très sensible du rapport Fe/Zn chez les plantes carencées, ce qui a conduit GANGWAR & MANN (1972) à proposer 10 comme valeur limite supérieure de ce rapport au-delà de laquelle la carence en zinc apparaît chez le riz cultivé en sol calcaire. Plus récemment, NAMBIAR & MOTIRAMANI (1981) ont montré, à la suite d'une expérimentation conduite en serre, également sur sol calcaire, que la valeur critique du rapport Fe/Zn (déterminée chez des plantules de maïs de 25 jours) à partir de laquelle on observe des chutes de rendement attribuables à une alimentation insuffisante en zinc, pouvait être fixée à 6.

Depuis 1972, des dispositifs expérimentaux implantés en plein champ sur sols acides ou calcaires nous ont conduits à faire des observations de même nature dans des cultures de maïs atteintes de carence en zinc par suite de surchauges (sols acides) ou d'absence de traitement correctif de la carence (sols calcaires). Ces observations sont à l'origine d'enquêtes systématiques effectuées pendant plusieurs années dans les grands secteurs maïsicoles d'Aquitaine, de Poitou-Charentes ou de Midi-Pyrénées. Le but de la présente note est de rendre compte du résultat de ces enquêtes et de tenter de fixer des valeurs critiques du rapport Fe/Zn permettant de déclencher la mise en œuvre des traitements de prévention ou de correction de la carence.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

La période d'enquête s'est déroulée de 1972 à 1981, dans des dispositifs expérimentaux de plein champ (destinés soit à la mise au point de méthodes de lutte contre la carence en zinc en sols calcaires, soit à évaluer l'effet de surchauges

en sols acides) ou dans des cultures où apparaissent par plaques des signes de déficience en cet oligo-élément.

Les informations concernant les emplacements géographiques des lieux de prélèvement, les types de sols, la plante et le nombre de prélèvements réalisés sont regroupés dans le tableau 1, dans lequel on a séparé les situations calcaires des situations non calcaires, les premiers résultats ayant mis en évidence des différences notables de l'alimentation en fer et en zinc des maïs provenant de ces 2 types de situation. Ce tableau fait clairement apparaître que la majorité des échantillons (6^e feuille d'une plante de 10 à 12 feuilles) prélevés correspondent à des stades précoces de développement du végétal pour lesquels il est encore tout à fait possible de faire intervenir des traitements de correction.

Les échantillons prélevés ont été séchés à 80 °C, broyés et tamisés à 1 mm et minéralisés par voie sèche (incinération au four à 480 °C pendant 2 h). Les cendres ont été reprises à chaud par de l'acide chlorhydrique; le fer et le zinc ont été dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique.

III. RÉSULTATS OBTENUS

Les figures 1 et 2, dans lesquelles on a représenté pour chaque échantillon, sain ou carencé et quel que soit le stade de développement, le rapport Fe/Zn et la teneur en zinc, mettent en évidence une plus grande variabilité de ce rapport (coefficient de variation de 83,5 p. 100 pour les sols non calcaires et de 59,3 p. 100 pour les sols calcaires) que celle de la teneur en zinc (coefficient de variation de 48,9 p. 100 pour les sols non calcaires et de 31,2 p. 100 pour les sols calcaires).

On peut déterminer graphiquement à partir de ces figures les niveaux limites au-delà ou en-deçà desquels ne se trouvent que des échantillons de maïs sains ou carencés: pour les populations étudiées, les teneurs en zinc correspondantes sont respectivement de 16 et 31 ppm (sols non calcaires) et 16 et 19 ppm (sols calcaires); pour ce qui concerne les rapports Fe/Zn, les niveaux limites sont de 16 et 32 (sols non calcaires) et de 8 et 12 (sols calcaires).

Ces valeurs limites ont permis d'établir des tableaux à double entrée (tabl. 2 et 3), dans lesquels figurent les pourcentages respectifs de plantes saines (par rapport à l'ensemble des plantes saines) et des plantes carencées (par rapport à l'ensemble des plantes carencées) pour chacune des classes ainsi définies.

L'examen de ces tableaux montre que le rapport Fe/Zn représente un meilleur critère de diagnostic de la déficience en zinc que la seule détermination de cet élément dans le végétal et cela notamment pour les sols non calcaires: en effet, pour ces derniers, on ne retrouve pour les teneurs en Zn inférieures à 16 ppm que 43 p. 100 de l'ensemble des échantillons carencés, alors qu'au-dessus du niveau limite de 32 retenu pour le rapport Fe/Zn, on isole 77 p. 100 des échantillons carencés. De même, pour les teneurs en zinc supérieures à 31 ppm, on ne retrouve que 50 p. 100 d'échantillons sains alors que ce pourcentage atteint 80 p. 100 quand le rapport Fe/Zn est inférieur à 16. Il subsiste une plage d'incertitude comprise entre les teneurs 16 et 31 ppm de Zn pour laquelle on observe 50 p. 100 des échantillons sains et 47 p. 100 des échantillons carencés, alors que la plage d'incertitude délimitée par les valeurs 16 et 32 du rapport Fe/Zn ne comporte que 20 p. 100 des échantillons sains et 22 p. 100 des échantillons carencés.

Pour les sols non calcaires, le rapport Fe/Zn apparaît donc bien comme étant beaucoup plus discriminant que la teneur en zinc puisqu'il permet d'isoler, hors des valeurs

TABLEAU 1

Origine des échantillons de maïs analysés.
Origin of the maize samples.

Situation géographique des prélèvements et type de sol	Année	Stade végétatif	Organe analysé	Nbre échantillons			
				Sains	Carencés		
Sols non calcaires	1) Pyrénées-Atlantiques, sur sol brun, acide, riche en matière organique :						
	● Expérimentation chaulage	1974	10-12 feuilles	6 ^e feuille	5	4	
		1975	10-12 feuilles	6 ^e feuille	5	4	
		1975	floraison	feuille épi	5	4	
		1976	8-10 feuilles	6 ^e feuille	5	5	
		1976	floraison	feuille épi	4	4	
		1977	11 feuilles	pl. entière	5	5	
		1978	11 feuilles	6 ^e feuille	5	5	
		1978	floraison	feuille épi	5	5	
		1979	floraison	feuille épi	5	15	
		1980	floraison	feuille épi	5	14	
	● Enquête en zones carencées	1981	10-12 feuilles	6 ^e feuille	5	5	
	2) Landes, sur sols limono-sableux pauvres en matière organique						
	Enquête en zones carencées						
	3) Haute-Garonne, sur sol argilo-limoneux						
Enquête		1981	10-12 feuilles	6 ^e feuille	1	1	
Total des échantillons issus de sols non calcaires :				74	90		
Sols calcaires	1) Expérimentation Zinc.						
	● Aude, sol argilo-calcaire		1972	10-12 feuilles	6 ^e feuille	8	8
	2) Enquêtes en zones carencées						
	● Chte-Maritime, sols argilo-calcaires		1981	10-12 feuilles	6 ^e feuille	15	15
	● Aude, sol argilo-calcaire		1981	10-12 feuilles	6 ^e feuille	1	1
Total des échantillons issus de sols argilo-calcaires :				24	24		

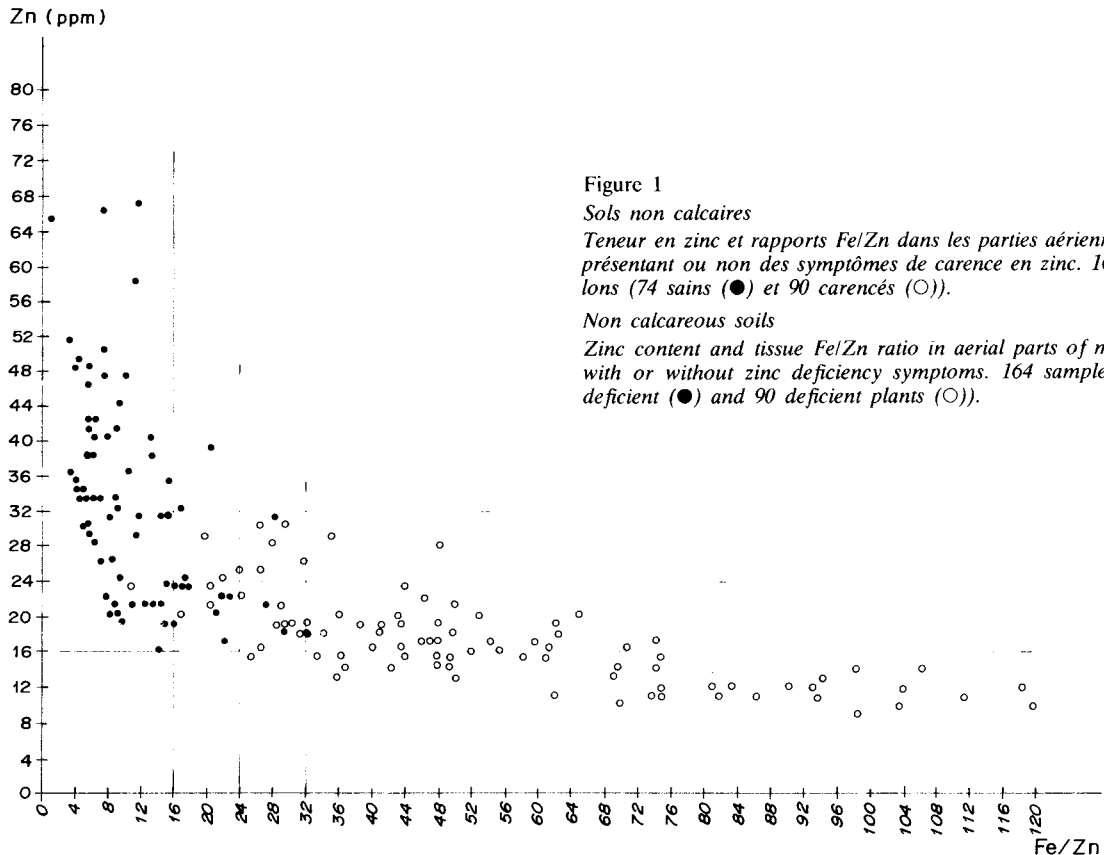


Figure 1
Sols non calcaires
Teneur en zinc et rapports Fe/Zn dans les parties aériennes de maïs présentant ou non des symptômes de carence en zinc. 164 échantillons (74 sains (●) et 90 carencés (○)).
Non calcareous soils
Zinc content and tissue Fe/Zn ratio in aerial parts of maize plants with or without zinc deficiency symptoms. 164 samples (74 non deficient (●) and 90 deficient plants (○)).

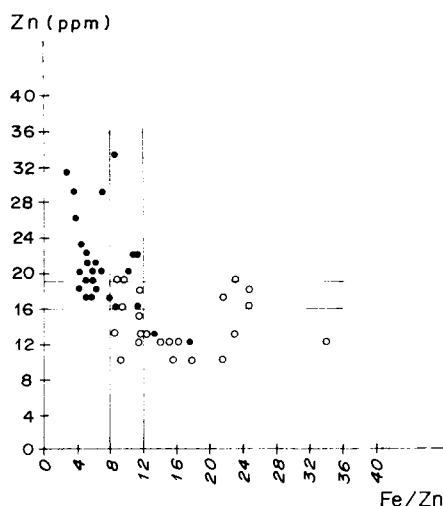


Figure 2

Sols calcaires

Teneur en zinc et rapports Fe/Zn dans les parties aériennes de maïs présentant ou non des symptômes de carence en zinc. 48 échantillons (24 sains (●) et 24 carencés (○)).

Calcareous soils

Zinc content and tissue Fe/Zn ratio in aerial parts of maize plants with or without zinc deficiency symptoms. 48 samples (24 non deficient (●) and 24 deficient plants (○)).

limites, un plus fort pourcentage de plantes carencées ou saines et que, par ailleurs, la plage d'incertitude incluse entre ces valeurs limites comporte un faible pourcentage d'échantillons carencés ou sains. D'autre part, l'examen du tableau 2 indique que la valeur 24 du rapport Fe/Zn constitue, avec une marge d'erreur de l'ordre de 5 p. 100, le seuil critique au-delà duquel les risques de carence sont hautement probables en sols non calcaires.

Dans le cas des sols calcaires, les teneurs en zinc inférieures à 16, de même que les valeurs du rapport Fe/Zn supérieures à 12, isolent les 2/3 de l'ensemble des échantillons carencés ; par contre, pour les teneurs en zinc supérieures à 20 ppm, on ne retrouve que 63 p. 100 des plantes saines alors que, pour les valeurs du rapport Fe/Zn inférieures à 8, on sépare 71 p. 100 de la population saine. Pour l'échantillonnage étudié, l'intérêt de l'utilisation du rapport Fe/Zn pour le diagnostic de la carence en zinc apparaît donc comme beaucoup moins évident que pour les sols non calcaires. La prise en compte des 2 critères (teneur en zinc inférieure à 16 ppm et rapport Fe/Zn supérieur à 12) permet cependant de cerner avec une certitude très satisfaisante la majorité des échantillons carencés (17 p. 100 seulement des plantes carencées de la population étudiée ne présentent pas ces caractéristiques).

IV. DISCUSSION ET CONCLUSION

Bien que très souvent observée par de nombreux auteurs, l'accumulation du fer chez les végétaux carencés en zinc (notamment le maïs) n'est pas encore clairement expliquée. S'il est vrai que GANGWAR & MANN (1972) ont montré qu'en conditions d'hydromorphie un excès d'absorption du fer peut entraîner une carence en zinc chez le riz, WARNOCK (1970) considère qu'une augmentation de la mobilité du fer dans le sol ne peut en aucune manière expliquer la très grande accumulation de cet élément observée dans un maïs sévèrement carencé ; selon cet auteur, l'accumulation du fer doit être considérée comme une conséquence et non une cause de la déficience en zinc. Les observations réalisées au

TABLEAU 2

Distribution, par classes, des échantillons de maïs, en fonction de la teneur en zinc et du rapport Fe/Zn des parties aériennes de la plante (en p. 100 des échantillons sains par rapport au total des échantillons sains, et en p. 100 des échantillons carencés par rapport au total des échantillons carencés).

Ranking of maize plant samples in relation to their Zn content and their tissue Fe/Zn ratio (% of non-deficient plants with respect to the whole non-deficient samples and % of deficient plants with respect to the whole deficient samples).

Teneurs en Zinc ppm	Etat des végétaux	Rapport Fe/Zn				Totaux
		< 16	16 à 24	24 à 32	> 32	
≤ 15	sains	—	—	—	—	—
	carencés	—	—	1,1	42,2	43,3
16 à 23	sains	16,2	10,8	4,1	—	31,1
	carencés	1,1	4,4	7,8	32,2	45,6
24 à 31	sains	16,2	1,4	1,4	—	18,9
	carencés	—	3,3	5,6	2,2	11,1
≥ 32	sains	47,3	2,7	—	—	50,0
	carencés	—	—	—	—	—
Totaux	sains	79,7	14,9	5,4	—	100
	carencés	1,1	7,8	14,4	76,7	100

Sols non calcaires

Non calcareous soils

TABLEAU 3

Distribution, par classes, des échantillons de maïs, en fonction de la teneur en zinc et du rapport Fe/Zn des parties aériennes de la plante. (en p. 100 des échantillons sains par rapport au total des échantillons sains, et en p. 100 des échantillons carencés par rapport au total des échantillons carencés).

Ranking of maize plant samples in relation to their Zn content and their tissue Fe/Zn ratio (% of non-deficient plants with respect to the whole non-deficient samples and % of deficient plants with respect to the whole deficient samples).

Teneurs en Zinc ppm	Etat des végétaux	Rapport Fe/Zn			Totaux
		< 8	8 à 12	> 12	
≤ 15	Sains	—	—	—	—
	carencés	—	16,7	50	66,7
16 à 19	sains	25	12,5	—	37,5
	carencés	—	16,7	16,7	33,3
≥ 20	sains	45,8	16,7	—	62,5
	carencés	—	—	—	—
Totaux	sains	79,8	29,2	—	100
	carencés	—	33,4	66,7	100

Sols calcaires

Calcareous soils

cours de ce travail paraissent confirmer cette hypothèse ; les fortes concentrations en fer rencontrées dans les échantillons fortement carencés peuvent laisser supposer, en effet, que la plante a tendance à compenser une difficulté d'approvisionnement en zinc par une absorption exagérée

du fer, comme si ce dernier pouvait partiellement se substituer au zinc dans les processus métaboliques dans lesquels ce métal intervient. La moindre disponibilité du fer en sol calcaire pourrait refréner cependant ce phénomène de compensation et expliquerait les plus faibles valeurs du rapport Fe/Zn observées chez les plantes carencées qui se développent sur ce type de sol par rapport à celles qui sont observées chez les maïs carencés issus de sols non calcaires.

Il convient de rappeler également qu'un certain nombre d'auteurs (BROWN & TIFFIN, 1962 ; LINGLE *et al.*, 1963 ; WATANABE *et al.*, 1965) ont montré qu'une alimentation exagérée en zinc pouvait, tout au contraire, déprimer fortement l'alimentation en fer de nombreuses plantes, et notamment du maïs, et provoquer chez ces dernières l'apparition de symptômes de chlorose ferrique, voire de toxicité en zinc (POMMEL, 1979), avec un abaissement du rapport Fe/Zn au-dessous de 1.

En raison des interactions intenses qui existent entre l'alimentation en fer et l'alimentation en zinc du maïs, la valeur du rapport Fe/Zn, déterminée dans les parties

aériennes du végétal aux premiers stades du développement de la plante, se révèle dans la plupart des cas comme un critère de diagnostic ou de prédiction de la carence en zinc supérieur à la seule détermination de la teneur en cet élément : dans les sols non calcaires, une déficience de l'alimentation en zinc peut être suspectée dès que le rapport Fe/Zn est supérieur à 24 ; dans le cas des sols calcaires, un rapport supérieur à 12, associé à une teneur en zinc inférieure à 16 ppm, correspond à une quasi-certitude d'apparition de la carence. Dans ces conditions, l'application d'un traitement préventif ou curatif de la carence (pulvérisations de produits zinciques) est à envisager.

Cependant, il reste bien entendu que, dans les secteurs où les probabilités de carence en zinc sont élevées, la détermination des quantités assimilables de ce métal dans le sol constituc, malgré les limites des méthodes actuellement utilisables, un bon préalable avant mise en place de la culture.

Reçu le 14 mars 1982.

Accepté le 24 août 1982.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ambler J. E., Brown J. C., 1969. Cause of differential susceptibility to zinc deficiency in two varieties of navy beans. *Agron. J.*, **61**, 41-43.
- Brown J. C., Tiffin L. O., 1962. Zinc deficiency and iron chlorosis dependent on the plant species and nutrient-element balance in Tulare clay. *Agron. J.*, **54**, 356-358.
- Dartigues A., 1964. Les déficiences en zinc chez les végétaux et leurs causes. *Ann. agron.*, **15** (6), 667-691.
- Dartigues A., 1970. *Contribution à l'étude de la mobilité de la réserve en zinc du sol. Application à l'alimentation du maïs dans le Sud-Ouest atlantique*. Thèse Dr. Ing., Bordeaux, n° 134, 109 p.
- Dartigues A., Delmas J., Lubet E., Routchenko W., 1963. Premiers résultats sur l'étude de la carence en zinc dans le Sud-Ouest. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 20/02/1963, 266-279.
- Dartigues A., Lubet E., 1967. Relation entre le pH du sol et la manifestation de la carence en zinc du maïs dans un secteur du Bassin de l'Adour ; possibilités et limites d'un diagnostic par l'analyse du sol. *Ann. agron.*, **18** (3), 285-299.
- Dartigues A., Lubet E., 1968. Résultats d'expérimentations culturales sur la carence et la toxicité du zinc dans quelques sols du Sud-Ouest. *Bull. Assoc. Fr. Ét. Sol*, **5**, 19-31.
- Gangwar M. S., Mann, J. S., 1972. Zinc nutrition of rice in relation of iron and manganese uptake under different water regimes. *Indian J. Agric. Sci.*, **42**, 1032-1035.
- Havlin J. L., Soltanpour P. N., 1981. Evaluation of the NH_4HCO_3 -DTPA soil test for iron and zinc. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, 70-74.
- Hiatt A. J., Massey H. F., 1958. Zinc levels in relation to zinc content and growth of corn. *Agronomy J.*, **50**, 22-24.
- Jackson T. L., Hay J., Moore D. P., 1967. The effect of Zn on yield and chemical composition of sweet corn in the Willamette Valley. *Amer. Soc. Hort. Sci. Proc.*, **91**, 462-471.
- Kennedy A. C., Brown J. R., 1981. A comparison of three extractants for soil zinc. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, 1000-1002.
- Lindsay W. L., 1972. Zinc in soils and plant nutrition. *Adv. in Agron.*, **24**, 147-186.
- Lingle J. C., Tiffin L. O., Brown J. C., 1963. Iron uptake-transport of soybeans as influenced by other cations. *Plant Physiol.*, **38**, 71-76.
- Massey H. F., 1957. Relation between dithizone-extractable zinc in the soil and zinc uptake by corn plants. *Soil Sci.*, **83**, 123-129.
- Nambiar K. K. M., Motiramani D. P., 1981. Tissue Fe/Zn ratio as a diagnostic tool for prediction of Zn deficiency in crop plants. I. Critical Fe/Zn ratio in maize plants. *Plant & Soil*, **60**, 357-367.
- Pommel B., 1979. Comparaison de l'utilisation par le maïs du phosphore des boues résiduelles ou du phosphate monocalcique pour différents niveaux de zinc et de fer dans le substrat. *Ann. agron.*, **30** (5), 443-453.
- Warnock R. E., 1970. Micronutrient uptake and mobility within corn plants (*Zea mays* L.) in relation to phosphorus-induced zinc deficiency. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **34**, 765-769.
- Watanabe F. S., Lindsay W. L., Olsen S. R., 1965. Nutrient balance involving phosphorus, iron and zinc. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **29**, 562-565.