

Déficiences en oligo éléments actuellement reconnues sur les plantes cultivées en France (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo) au cours de la dernière décennie

par A. LOUE*

SOMMAIRE

Le but de cet article est l'examen des connaissances acquises en France depuis la parution du numéro des « Annales Agronomiques » de 1970 consacré à l'ensemble du sujet des oligo-éléments en agriculture, en matière de diagnostic, de prévention et de thérapeutique des déficiences en oligo-éléments (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo) sur les plantes cultivées en France.

INTRODUCTION

Le sujet des oligo-éléments dans l'agriculture française actuelle serait très vaste et le choix du titre indique que l'auteur a voulu se limiter au problème des déficiences végétales, à l'exclusion des toxicités et, a fortiori, des problèmes de pollution (qui peuvent aussi concerner des oligo-éléments, surtout des métaux lourds, non reconnus comme utiles et susceptibles d'être toxiques pour les plantes et les animaux).

Sont également exclus les problèmes de carences en oligo-éléments des fourrages et cultures fourragères appréciées en fonction des besoins des animaux et dont on sait que les seuils sont sensiblement supérieurs aux seuils de carence par rapport aux besoins des cultures. Le but de la présente note est de faire le point des acquisitions obtenues dans le domaine des oligo-éléments depuis 1970, année où fut publiée dans les « Annales Agronomiques » une synthèse exhaustive faisant un point complet de la question à cette date.

LE FER

Depuis 1970, il y a eu d'assez nombreuses études et publications sur la chlorose ferrique et plus particulièrement en viticulture. Elles concernent le déterminisme physiologique de la chlorose, l'étude des facteurs du milieu favorisant son apparition et les méthodes de lutte.

* Chef du Département Recherche et Agronomie S.C.P.A.

DETERMINISME PHYSIOLOGIQUE DE LA CHLOROSE SUR VIGNE.

S'il est bien établi que la chlorose ferrique résulte d'une alimentation en fer insuffisante, le mécanisme explicatif n'en est pas totalement élucidé (BRANAS, 1974 ; POUGET *et al.*, 1971).

La thèse la plus admise est qu'une modification du métabolisme des racines est induite par la présence d'ions bicarboniques ou par le pH élevé du milieu, d'où il résulte une diminution du transfert des racines vers les organes aériens. La présence d'ions bicarboniques abondants dans le milieu extérieur peut perturber la synthèse de l'acide citrique dans les racines, gênant ainsi la formation du complexe fer-acide citrique (GAY-BELLILE, 1972). Le fer a besoin de la présence de l'anion citrique pour être transporté dans la sève. La teneur en glucides du système radiculaire est très importante pour l'alimentation de la plante en Fe.

L'acide citrique est synthétisé dans les racines en partant des glucides, puis migre vers les parties aériennes où il s'oxyde en acide malique. Si la quantité de glucides est faible, la synthèse de l'acide citrique s'en trouve diminuée ainsi que la migration de Fe vers les organes aériens.

L'approvisionnement en glucides des racines joue donc un rôle important dans l'intensité de la chlorose (POUGET, 1974). POUGET (1973) a montré en particulier qu'un porte-greffe résistant à la chlorose comme le 41 B pouvait chloroser très fortement après une incision annulaire ; d'une manière générale, tous les obstacles à la circulation de la sève élaborée tels que le bourrelet de greffe favorisent l'apparition de la chlorose (JUSTE *et* POUGET, 1978).

Selon POUGET *et al* (1971), la chlorose ferrique peut entraîner des modifications de l'absorption minérale. Les rapports K/Ca et P/Fe sont plus élevés dans les feuilles chlorotiques, P et K ayant tendance à s'accumuler dans les tissus des plantes chlorotiques.

HETIER *et* FARDEAU (1977) ont essayé de transposer au cas du fer la méthode de dilution isotopique utilisée pour le phosphore, mais le problème subsiste de montrer que la partie du fer du sol dite « isotopiquement diluable » correspond à peu près aux réserves de fer assimilable par les plantes.

FACTEURS DU MILIEU FAVORABLES A LA CHLOROSE.

Bien qu'elles puissent apparaître un peu fragmentaires, les recherches poursuivies en France en ce domaine au cours de la dernière décennie ont permis de mieux connaître les facteurs du milieu favorables à la manifestation de la chlorose Fe.

Celle-ci dépend effectivement de nombreux facteurs dont le taux élevé de calcaire ou de bicarbonate est dominant.

La teneur en eau joue également un rôle certain (pluies de printemps abondantes, façons culturales créant des conditions asphyxiantes pour les racines, telles que le passage trop répété des instruments, les irrigations trop copieuses). Inversement, les chloroses sont plus discrètes sur des sols secs ou au cours d'années sèches (POUGET *et al.*, 1971, GAY-BELLILE, 1972). La teneur en eau du sol intervient surtout en favorisant la formation d'ions bicarboniques à partir des particules de calcaire. CALLOT *et* JAILLARD (1980) ont expliqué la présence de zones de chlorose par un hydromorphisme en milieu carbonaté, se traduisant par la présence d'abondants cristaux de carbonate au contact des racines.

L'incorporation dans le sol de substances organiques facilement biodégradables (dégagement de CO₂) peut induire une chlorose intense due à l'augmentation rapide de la concentration en ions bicarboniques. Mais il a été démontré par COURPRON *et* JUSTE (1975), dans un essai en vases de végétation, avec le lupin blanc comme plante test, que l'addition de différentes sources de matières organiques (tiges de maïs *et*

DEFICIENCES EN OLIGO-ELEMENTS SUR LES PLANTES

paille de blé) diminue beaucoup l'état chlorotique des plantes, si elles ont été fermentées au préalable dans le sol. L'effet antichlorosant du sulfate de fer est fortement augmenté quand il est incorporé au sol en même temps que les résidus végétaux.

La texture du sol intervient aussi, la chlorose étant favorisée par des teneurs élevées en éléments grossiers.

Il existe des interactions entre nutrition en fer et nutrition en phosphore, mais les faits ne sont pas nets en ce qui concerne la chlorose.

Les agronomes ont cherché à améliorer les tests de mesure du pouvoir chlorosant des sols. Ce dernier dépend, bien sûr, de l'abondance du calcaire très fin et le calcaire actif avait effectivement permis d'établir un étalonnage des porte-greffes de la vigne, mais le taux de calcaire actif se trouvait parfois en défaut.

JUSTE et POUGET (1972) ont eu l'idée d'associer à la notion de calcaire actif celle du fer facilement extractible (le réactif d'extraction adopté étant l'oxalate d'ammonium) et ils ont défini l'indice de pouvoir chlorosant suivant :

$$\text{I.P.C.} = \frac{\text{CO}_3 \text{ Ca} \times 10^4}{(\text{Fe})^2}$$

avec $\text{CO}_3 \text{ Ca}$ = calcaire actif (en % de terre fine)

Fe = teneur en fer facilement extractible (en mg/kg de terre fine).

Il a été possible aux auteurs d'établir une échelle de résistance des porte-greffes de la vigne (POUGET et JUSTE, 1972).

Le concept d'I.P.C. a également été utilisé en arboriculture. C'est ainsi que, sur prunier d'Ente, HUGUET J.-G. et al. (1975) ont étudié le risque de chlorose dans un sol donné et l'amélioration du traitement. Ils ont pu relier la gravité de la chlorose à l'I.P.C. du sous-sol, dont les variations expliquaient 56 % ou plus des variations de la teneur en chlorophylle. L'échelle d'appréciation des risques permettrait de conseiller le choix des terrains pour les nouvelles plantations.

L'I.P.C. n'est cependant pas considéré comme un test infailliable. Il faudrait pouvoir tenir également compte de la teneur en eau, des façons culturales, des fumures organiques, etc.

MORLAT (1976), étudiant la chlorose ferrique dans les sols viticoles calcaires du Saumurois, estime que les différences de comportement de la vigne ne s'expliquent pas par le degré d'évolution pédologique des sols, mais par une hétérogénéité des faciès géologiques.

MORLAT, DUPONT et SALETTE (1980) ont recherché également dans les sols calcaires de la moyenne vallée de la Loire les liaisons entre la chlorose ferrique de la vigne et les caractéristiques climatiques de l'année, en fonction du type de profil pédologique. Sur les pentes, il s'agit de chloroses classiques d'année humide, dont l'importance peut effectivement être reliée à la teneur en fer facilement extractible de chaque horizon. La chlorose d'année sèche s'observe sur des profils pédologiques particuliers, correspondant à des situations topographiques de plateaux, replats et bas de pente.

Ces derniers sols présentent vers 60 à 80 cm un niveau d'accumulation des carbonates, très riche en calcaire fin et pauvre en fer. En période sèche, les racines de la vigne prolifèrent dans cette zone et il en résulte une augmentation de la pression de CO_2 , qui favorise la production d'une grande quantité de bicarbonate. Ces auteurs ont mis l'accent sur l'importance de l'interaction entre le pouvoir chlorosant spécifique de chaque horizon pédologique d'un sol calcaire avec le degré de développement de l'enracinement de la vigne, en fonction du climat de l'année, pour expliquer les chloroses Fe. Il est intéressant de signaler qu'ils ont proposé comme application pratique une lutte préventive basée sur la cartographie pédologique des zones viticoles calcaires en distinguant, d'après le type de profil pédologique :

- les sols calcaires minces (40 cm au maximum) du type rendzine, susceptibles de présenter des chloroses Fe d'années humides ;
- les sols calcaires à calciques épais ou calciques à horizons d'accumulation de carbonates, susceptibles de présenter des chloroses d'année sèche.

METHODES DE LUTTE CONTRE LA CHLOROSE FERRIQUE.

Les moyens de lutte contre la chlorose ferrique se situent dans deux domaines très différents :

1. L'amélioration des méthodes de prévention et de correction chimiques.
2. La sélection de matériel végétal plus résistant.

Les méthodes chimiques utilisées en arboriculture et viticulture cherchent à accroître la quantité de fer rapidement assimilable du sol. Il n'y a pas eu de progrès vraiment significatif en ce domaine au cours de la décennie écoulée.

Dans le vignoble de Cognac (GAY-BELLILE, 1972), par exemple, on préconise avant la plantation des apports de sulfate ferreux (3 à 8 t/ha) au moment du labour. Sur vigne en place, on conseille des apports de 3 à 5 t/ha de sulfate enfoui par sous-solage ou dans la dérayure centrale et recouvert rapidement par une façon culturale. L'apport de sulfate de fer (1 kg dissous dans 10 litres d'eau, par cep) est considéré comme la meilleure technique.

Les pulvérisations foliaires de solutions de sels de fer peuvent être efficaces à condition d'intervenir dès les premiers symptômes.

La décennie a vu naître des formulations à base de nitrate de fer (Veronia, Verdifer) qui peuvent présenter une certaine efficacité, mais avec parfois certains risques de phytotoxicité et un manque d'efficacité aux stades avancés de chlorose.

La littérature postérieure à 1970 comporte évidemment divers comptes rendus expérimentaux sur la comparaison des produits.

C'est ainsi qu'en Alsace, MEYER et BRECHBULHLER (1975) concluent que, dans le cas d'une vigne gravement atteinte, le seul remède est apporté par le Sequestrène granulé (Chélate de fer EDDHA) mais avec une dépense élevée estimée de l'ordre de 3.000 F/ha. Dans le cas des vignes moins sévèrement chlorosées, les auteurs conseillent les apports foliaires soit de sulfate de fer (0,5 à 0,8 %) + acide citrique (0,05 à 0,10 %), soit de nitrate de fer (en particulier Veronia). Mais, d'autre part, des pratiques culturales judicieuses (diminution du nombre des labours et enherbement temporaire mulché) sont susceptibles de faire régresser la chlorose d'une façon importante. Sur prunier d'Ente, HUGUET J.-G. et al. (1975) préconisent l'apport d'une dose faible de chélate EDDHA au pied de l'arbre, en localisation en profondeur.

MORLAT et COURBE (1980) pensent que, dans la lutte curative, les moyens à mettre en œuvre dépendent du type de chlorose considéré. Dans le cas de la chlorose d'année sèche, la solution serait de maintenir un maximum d'enracinement en surface et de limiter les pertes d'eau par évaporation, grâce au mulching. Ils ont aussi orienté leur études vers des possibilités de fourniture de fer à partir de certains matériaux comportant des silicates comme les glauconies et de matériaux d'altération des pyrites de fer permettant une libération progressive de fer assimilable par la plante.

La voie génétique est sans doute celle qui a été la plus étudiée depuis 1970 et où les progrès ont été les plus significatifs. C'est un fait très connu que les porte-greffes de la vigne influencent beaucoup la manifestation de la chlorose. Le système foliaire de la vigne peut également présenter des exigences différentes selon les variétés, pour la synthèse de la chlorophylle (BRANAS, 1974 ; POUGET et OTTEN-WAELTER, 1978).

Il en est de même chez les arbres fruitiers pour lesquels C. HUGUET (1970) avait signalé les liaisons entre la résistance à la chlorose et la résistance à l'asphyxie radiculaire des porte-greffes du pêcher. La chlorose ferrique concerne surtout le pêcher greffé sur franc, le poirier sur cognassier et le pommier en sol très calcaire (GAUTIER, 1978).

On sait qu'en sol calcaire, le pêcher est très sensible à la chlorose ferrique ; l'amandier est très résistant et les hybrides pêcher × amandier sont intermédiaires. BINDRA et al. (1972) ont recherché si ces réactions différentes provenaient d'aptitudes particulières au niveau de l'absorption radiculaire du fer ou d'aptitudes au transport Fe vers les points de croissance. Ils ont effectivement montré que la moindre sensibilité de certaines lignées de pêcheurs à la chlorose correspondait à une plus grande aptitude au transport du fer de la racine vers les pousses.

Ils ont également étudié l'effet de différentes combinaisons de greffage sur la chlorose ferrique.

En viticulture, les recherches de l'I.N.R.A. de Bordeaux se sont orientées vers l'obtention de porte-greffes plus résistants à la chlorose.

POUGET et OTTENWALTER (1973) ont mis au point la méthode dite des greffes réciproques qui consiste à observer, dans un sol très chlorosant, le comportement de quatre sortes de greffes réalisées avec deux variétés à comparer. La méthode permet d'analyser séparément l'aptitude du système radiculaire à extraire le fer du sol et donc à satisfaire les besoins en fer du système foliaire et les exigences en fer de ce dernier.

Greffon	X	;	X	;	41 B	;	41 B
Porte-greffe	X		41 B		41 B		X

X sera supposé plus résistant à la chlorose que 41 B si $\frac{X}{X}$ est moins chlorosé que $\frac{X}{41 B}$

$\frac{X}{41 B}$ et si $\frac{41 B}{X}$ est moins chlorosé que $\frac{41 B}{41 B}$.

Ces travaux ont conduit en particulier à l'obtention de Fercal, nouveau porte-greffe plus résistant à la chlorose que le 41 B. Fercal tolérerait un indice de pouvoir chlorosant de 100, contre seulement 70 pour le 41 B (POUGET et OTTENWALTER, 1978 ; POUGET, 1980).

On peut conclure avec JUSTE et POUGET (1980) que, si la solution de la sélection de variétés résistantes est élégante, il n'en reste pas moins très important que soient mieux appréhendés certains points relatifs au déterminisme physiologique de la chlorose (rôle des ions bicarboniques, mode d'absorption et de transport du fer en fonction des besoins de l'appareil foliaire) et au comportement du fer en sols calcaires (en particulier approfondissement des effets de l'eau et de la texture du sol).

LE MANGANESE

Il semble y avoir eu en France très peu d'études sur le manganèse dans les sols ou les plantes, au cours de la dernière décennie.

La carence Mn est effectivement très rare dans le vignoble en raison de l'utilisation de composés organo-métalliques à base de Mn (ou de Zn), comme le dithiocarbamate de manganèse (manèbe) dosant 20 % Mn et qui couvre en quelques pulvérisations les besoins de la vigne.

Au plan analytique, certains laboratoires dosent Mn échangeable, d'autres Mn réductible et d'autres Mn dit actif qui est la somme de Mn échangeable + Mn facilement réductible.

Pourtant, selon D. BERTRAND (1973) étudiant les dosages de Mn échangeable sur 224 sols représentatifs de grandes surfaces, 75 % des terres seraient pauvres, la grande majorité se situant entre 0,2 et 0,4 ppm sans que l'on puisse pour autant détecter les symptômes de la déficience.

Depuis quelques années, cependant, divers cas de déficiences Mn sont relatés sur céréales dans diverses régions (Champagne, Poitou-Charentes, par exemple). D'assez nombreux tests en bandes « avec et sans » ont été réalisés. Ils ont surtout montré une légère subcarence principalement sur blé dans les argilo-calcaires du Barrois et, d'une manière assez générale, dans les sols nettement riches en matière organique. En rotation betterave-blé, on assisterait à une certaine diminution des teneurs en manganèse. Dans les cas typiques de déficience Mn, on sait que toute la plante est atteinte d'une couleur pâle, voire de jaunissement complet, avec parfois des ponctuations brunes typiques entre les nervures sur feuilles âgées. Il est également bien connu que, sur sols mal structurés, si le blé apparaît plus vert en zones plus tassées, on peut soupçonner une déficience Mn, au moins temporaire.

La supériorité de la correction foliaire est tout à fait admise.

En somme, en ce qui concerne Mn, la dernière décennie est surtout à l'origine d'observations à portée très pratique.

LE ZINC

On peut résumer la situation postérieure à 1970 en disant que les problèmes Zn ont été peu étudiés en France alors que, paradoxalement, les cas détectés de carences et de subcarences y ont été très nombreux.

Les cultures concernées sont surtout le maïs et secondairement le lin et diverses cultures légumières. Il est certain que le problème de la carence en zinc chez le maïs est un des grands sujets d'études en matière d'oligo-éléments. Il mérite donc quelques développements. Ajoutons, pour mémoire, qu'en ce qui concerne les problèmes de composition minérale et de qualité des fourrages, de nombreuses études ont abordé le zinc.

QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX Zn SUR MAIS.

Les résultats suivants ont été obtenus depuis une dizaine d'années par le Département d'agronomie S.C.P.A. Les doses de zinc étudiées étaient en général de 0, 3, 6, ou 0, 6, 12 kg/ha de zinc métal, sous forme de zinconia.

Le tableau 1 rapporte des résultats assez typiques du problème zinc sur maïs car obtenus dans deux conditions de sols très différentes :

A La Ville-aux-Clercs, il s'agit d'un limon fin (60 % d'éléments compris entre 0,05 et 0,002 mm), sur argile à silex, à pH modérément alcalin 7,5, enrichi en P_2O_5 (0,37 ‰), pauvre en zinc (1 ppm).

A Uzay-le-Venon, il s'agit d'un argilo-calcaire (36 % de calcaire total) riche en matière organique, bien pourvu en P_2O_5 (0,30 ‰), très pauvre en zinc (0,5 ppm).

Dans les deux cas, l'effet zinc a été très marqué, de l'ordre de + 20 q/ha. Le rendement maximal aurait correspondu à 5,5 kg/ha Zn à La Ville-aux-Clercs et à une dose très supérieure à Uzay-le-Venon où la déficience était beaucoup plus grave et la réponse pratiquement linéaire.

Les deux essais ont été suivis par analyse de la feuille de l'épi à la floraison. Dans les deux cas, les teneurs en phosphore sont pléthoriques (fertilisation phosphatée excessive de P260 à La Ville-aux-Clercs sur sol déjà à l'entretien). Les teneurs en zinc sont très faiblement influencées par les traitements. A Uzay-le-Venon, l'analyse de plantes entières prélevées le 11 juillet a montré un effet Zn considérable sur le développement mais très faible sur les teneurs en Zn, par suite de dilution. L'aspect des maïs indiquait nettement que la guérison était très partielle avec 12 kg/ha Zn.

TABLEAU 1. — Effet zinc sur maïs dans deux conditions de sols.

TABLE 1. — Zinc effect on corn in two soil conditions.

Ville aux Clercs(Loir et Cher)1972					Uzay-le-Venon (Cher) 1972						
kg/ha Zn	Grains q/ha H ₂ O%		Diag. fol. P% Zn(ppm)		kg/ha Zn	Grains q/ha H ₂ O%		Plantules g m.s. Zn 10 pieds ppm		Diag. fol. P% Zn(ppm)	
Zn0	29,7	44,1	0,62	19,7	Zn0	32,0	49,8	25,0	27,7	0,63	20,2
Zn3	46,3 ^{xx}	41,3 ^x	0,58	21,3	Zn6	42,2 ^{xx}	46,8 ^x	44,5 ^{xx}	27,5	0,60 ^x	20,0
Zn6	50,5 ^{xx}	40,6 ^{xx}	0,53 ^{xx}	21,8	Zn12	52,4 ^{xx}	45,0 ^{xx}	71,0 ^{xx}	29,0	0,56 ^{xx}	19,8
ppds 0,05	4,0	2,2	0,05	3,2	ppds 0,05	5,8	2,9	9,4	2,8	0,03	1,2
ppds 0,01	6,0	3,3	0,08	-	ppds 0,01	8,8	4,4	14,3	-	0,05	-

L'essai d'Uzay-le-Venon est très typique des conditions reconnues comme causes d'une sévère déficience zincique sur maïs : pauvreté en zinc, sol très calcaire, pH élevé, fertilité P₂O₅ élevée.

L'essai de La Ville-aux-Clercs, où l'effet Zn est très net, correspond à des conditions moins évidentes de problème Zn : pauvreté en zinc, fertilité P₂O₅ très élevée.

Un certain nombre d'essais ont été ainsi réalisés depuis dix ans en Charente-Charente-Maritime, Vienne, Loiret, Isère, etc., avec des effets positifs de Zn0 à Zn6, allant de 0,7 à 11,3 q/ha. En ce qui concerne les trois caractéristiques suivantes du sol : calcaire total, P₂O₅ assimilable, Zn disponible, on notait toujours la présence de deux d'entre elles et des trois dans les cas de fortes réponses.

Les conditions de sols susceptibles d'entraîner un mauvais enracinement du maïs (cas de La Ville-aux-Clercs) semblent devoir être considérées comme une cause importante de réalisation d'un état de subcarence Zn.

L'interaction P × Zn a également été étudiée par subdivision de parcelles sur certains essais, comme celui de Villieu (Ain) en 1980 et 1982 (tableau 2).

Il s'agit d'un sol d'alluvions, à texture très grossière (55 % d'éléments supérieurs à 2 mm), à pH acide 6,0, moyennement pourvu en P₂O₅ (0,15‰ citrique), faiblement pourvu en Zn. L'interaction P × Zn a été cependant très nette sur ces maïs fortement irrigués.

TABLEAU 2. — Essai de Villieu (Ain) - Interaction P × Zn en 1980.

TABLE 2. — P × Zn interaction at Villieu (Ain), 1980.

Q/ha	P0	P150	Effet Zn	ppm Zn	P0	P150	Effet Zn
Zn0	78,2	80,4	79,3	Zn0	21	18	19
Zn3,4	79,5	86,2	82,8	Zn3,4	25	23	24 ^{xx}
Effet P	78,8	83,8 ^x		Effet P	23	20 ^{xx}	
ppds 0,05 = 4,0 q/ha				ppds 0,01 = 2 ppm			

Sur le rendement, l'effet Zn a été positif et proche de la signification et on a noté surtout qu'il ne se manifestait nettement qu'en présence de P150 (+ 5,8 q/ha). Cette forte interaction positive s'explique assez bien par les niveaux zinciques foliaires. Ces derniers sont abaissés par P₂O₅ ce qui peut être néfaste en l'absence de zinc (Zn0).

Ces résultats ont été confirmés en 1982, avec un effet zinc positif hautement significatif (113,3 à 119,4 q/ha) et une interactions P × Zn très positive caractérisée par un effet P₂O₅ nettement dépressif en l'absence de zinc.

CONDITIONS DE MILIEU FAVORABLES A LA DEFICIENCE Zn SUR MAIS.

Les facteurs sols les mieux corrélés avec l'assimilabilité du zinc par le maïs et sa réponse aux apports zinciques sont les suivants :

1. La teneur en Zn disponible, facteur primordial ;
2. Le pH et le taux de calcaire, facteurs explicatifs très importants dont l'interprétation de Zn disponible doit tenir compte ;
3. La richesse du sol en P₂O₅, facteur d'importance variable mais très fréquente.

Les autres facteurs du milieu susceptibles d'interférer semblent être :

4. Les basses teneurs en matière organique et l'érosion du sol de surface ;
5. Le mauvais développement du système racinaire ;
6. Les basses températures après le semis.

Le problème de l'interférence P × Zn a donné lieu à de très nombreuses études. On a estimé, pendant longtemps, que les déficiences Zn induites par P sont en relation avec le système sol et ne sont pas dues à une immobilisation de Zn par P à l'intérieur de la plante. Certains résultats expérimentaux tendent à prouver que la déficience Zn induite par P est nettement de nature physiologique au niveau de la surface racinaire ou dans les cellules de la racine.

TRIBOI et FARDEAU (1977) ont étudié la disponibilité en zinc dans le sol en fonction de divers traitements (doses et formes d'amendements calcaïques et d'engrais phosphatés, doses de zinc) par la technique de la dilution isotopique « in vitro » et « in vivo », en déterminant les valeurs E et L. Les valeurs L étaient calculées à partir de ray-grass sur plantes âgées de 30 jours cultivées sur terres doublement marquées avec ³²P et ⁶⁵Zn.

La mesure du pool d'ions Zn isotopiquement échangeables par la valeur L s'est avérée nettement meilleure que la mesure « in vitro » (valeur E). Ces auteurs ont pu constater que : 1. le chaulage diminuait la disponibilité du Zn dans le sol ; 2. l'antagonisme P/Zn semblait se produire au niveau de la plante ; 3. les apports de zinc augmentaient le pool d'ions échangeables.

Le facteur P est à prendre en compte d'une manière sélective. On sait en particulier que les hybrides présentent des tolérances très variables à la déficience Zn induite par P.

INTERPRETATION DES DOSAGES DE ZINC DANS LES SOLS.

En France, divers laboratoires extraient Zn à HCl, mais à des concentrations variables (0,2 N - 0,1 N - 0,05 N). Certains utilisent l'oxalate NH₄ en sols calcaires et HCl 0,2 N pour les autres sols. A l'I.N.R.A., certaines stations semblent pratiquer l'extraction à HCl 0,2 N et d'autres l'extraction à l'EDTA.

La méthode dite de Laon extrait Zn par EDTA avec l'acétate NH₄ en présence d'un rapport sol/solution de 1/10 et 2 heures d'agitation.

La figure 1 indique les principales normes d'interprétation de Zn dans les sols en France. Il arrive que sept zones d'appréciation soient indiquées mais ces distinctions sont très théoriques, car, en l'état actuel des connaissances, on ne peut guère distinguer que trois classes : très faible, faible, normal.

En France, on pourrait disposer d'un assez grand nombre de résultats pour HCl 0,2 N et pour l'EDTA, mais il y aura un intérêt certain à parvenir à une certaine normalisation des méthodes, en vue d'améliorer le diagnostic d'interprétation.

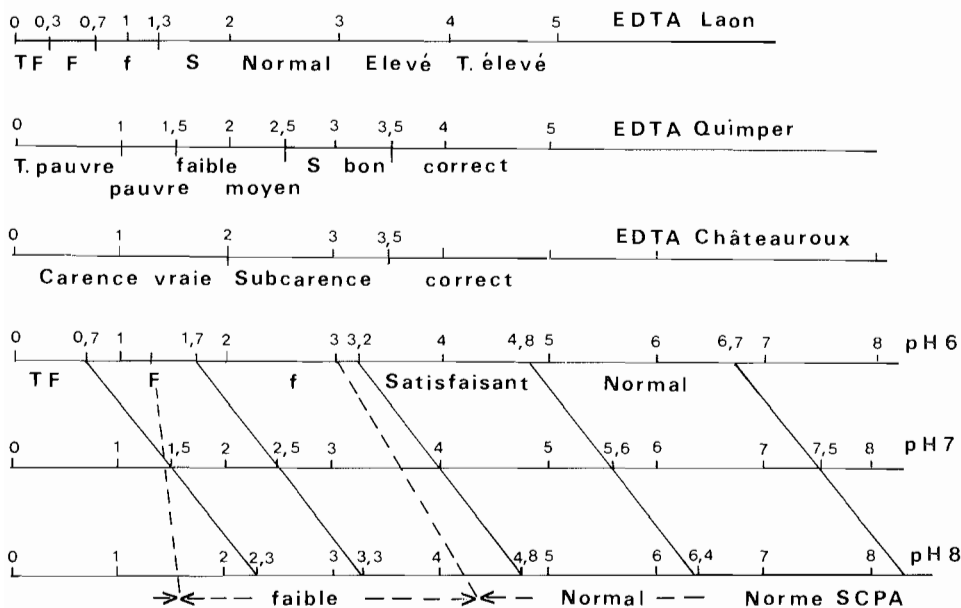


FIGURE I. — Interprétation Zn sols (extractions EDTA et HCl).

FIGURE I. — Calibration of Zn soil (E.D.T.A. and HCl extractions).

INTERPRETATION DES TENEURS EN ZINC DU MAÏS.

En l'état actuel des tests analytiques concernant les sols pour les oligo-éléments, l'analyse de la plante peut présenter en ce domaine un intérêt particulier. Il y a eu beaucoup de travaux en vue de la détermination des teneurs critiques en Zn chez le maïs. En fait, ce problème est influencé par la position de la feuille analysée, le stade de développement et éventuellement la variété. Les teneurs en Zn sont en général plus élevées dans les feuilles de la partie supérieure de la plante ainsi qu'au cours des premiers stades de la croissance.

L'interprétation moyenne suivante des teneurs en Zn de la feuille de l'épi, a été proposée par LOUÉ (1983) à partir du contrôle d'essais et d'enquêtes de nutrition.

Zn (ppm)	Interprétation
< 10	Très grave déficience, symptômes certains.
11 à 15	Déficience certaine, symptômes probables dans les premiers stades sinon ultérieurement, selon les variétés.
16 à 20	Grand risque de déficience.
21 à 25	Teneurs critiques pour de nombreuses situations. Risque de précarence dans certains cas.
> 25	Normal, sauf cas variétal.

Le diagnostic Zn plante maïs pourrait être amélioré selon LUBET, SOYER et JUSTE (1983) en considérant aussi le rapport Fe/Zn. On sait qu'il y a une accumulation très nette de fer dans les maïs déficients en zinc. Ces auteurs estiment que le rapport Fe/Zn est plus discriminant que la seule teneur Zn pour la prévision de la déficience zincique. Sur sols non calcaires, la valeur critique de ce rapport est vers 24 et, en sols calcaires, il y aurait un risque certain de déficience pour des rapports supérieurs à 12.

LE CUIVRE

ETAT DU PROBLEME EN 1970.

La carence en cuivre a été détectée vers les années 1950 en Bretagne et surtout étudiée par la Station de Quimper (COPPENET, 1970).

Les faits essentiels peuvent se résumer ainsi :

1. Sols concernés : carence nette d'abord sur sols granitiques, puis sur sols gréseux. Risque certain si Cu total (extrait par le mélange des acides nitrique et perchlorique) < 7 à 8 ppm.

2. Cultures sensibles :

- a) céréales (avoine, blé, orge, à l'exclusion du seigle),
- b) graminées fourragères (plus résistantes que les céréales),
- c) légumineuses fourragères (trèfle violet nettement plus sensible que trèfle blanc),
- d) cultures maraîchères de plein champ (surtout petits pois).

3. Signes : décoloration des extrémités des plus jeunes feuilles (maladie des bouts blancs).

4. Traitements : enfouir 30 kg/ha Cu SO₄, 5 H₂O ou pulvérisations foliaires d'oxychlorure de cuivre à 1,5 %.

La carence est en principe inexistante s'il y a eu, dans le passé, des traitements anticryptogamiques à base de sels de cuivre.

La carence Cu a été aussi mise en évidence sur maïs dans les sols sableux des Landes. Pour les autres régions, les auteurs n'ont pas fait état de problème cuprique sinon, à l'opposé, de problèmes de toxicités en particulier dans les sols acides ; l'accumulation de Cu due aux pulvérisations anticryptogamiques sur vigne a pu devenir toxique comme ce fut le cas dans le vignoble du bordelais, selon DELAS et DARTIGUES (1970).

Pour les arbres fruitiers enfin, C. HUGUET (1977) indiquait aussi que les déficiences cupriques sont des cas très isolés, en sols acides et pauvres en matière organique. Il existe cependant des symptômes typiques, mais l'analyse du végétal est utile (teneurs < 5 ppm associés aux déficiences).

LES DEFICIENCES CUPRIQUES RECENTES.

Depuis quelques années des déficiences très probablement imputables au cuivre ont été signalées sur céréales dans le Centre et l'Est de la France.

Dans l'Aube en particulier, on a signalé une maladie du blé, dite maladie des « épis vides ». On constate, juste avant maturation, que les épis sont totalement vides. Des constatations assez semblables ont été faites dans la Marne, l'Yonne, en Poitou-Charantes, dans le Centre. Le problème a été plus particulièrement étudié dans l'Aube (réunion organisée par l'I.T.C.F. à Troyes sur ce sujet en octobre 1982). La maladie des épis vides a surtout été observée en terres blanches. Deux essais de Cu SO₄ ont été réalisés, dont un seul fut très parlant (tableau 3).

TABLE 3. — *Example of Copper deficiency on Wheat (q/ha) after I.T.C.F.*

TABLEAU 3. — *Essai Cuivre sur blé dans l'Aube. Rendements en q/ha (d'après I.T.C.F.).*

T	Cu SO ₄ 25 kg/ha	T	Cu SO ₄ 50 kg/ha	T	Cu SO ₄ 25 kg/ha	T	Cu SO ₄ 50 kg/ha	T
46,0	73,6	40,7	75,4	57,3	78,3	68,0	78,3	72,3

On note donc un très fort gradient de sensibilité pour le témoin sans Cu et un effet très marqué du sulfate de cuivre, allant de + 30 à + 10 q/ha selon la position sur le terrain. L'effet Cu s'est révélé positif sur les trois composantes du rendement (épis/m², grains/épi et poids de 1.000 grains). En l'absence d'épis vides, le rendement peut encore être accru, grâce à une amélioration du poids de 1.000 grains. Il s'agit dans le cas présent de terres de défriches de 15 à 20 ans.

Dans l'Yonne, des faits semblables ont été rapportés en terres de défriches sur argilo-calcaires du Tonnerrois et, en particulier, de nombreux cas d'épis incomplets sur les escourgeons.

Au niveau du sol, en Champagne crayeuse de l'Aube, on estime qu'il y a possibilité d'un effet Cu jusqu'à 2,5 ppm.

Des surfaces assez importantes pourraient être concernées.

On estime également que la déficience Cu est peu probable si le taux de matière organique ne dépasse pas 3,0 à 3,3 % et que le risque commence vers un taux de 4 %.

Dans l'étude qui a été faite des caractéristiques de sols de couples « zones saines / zones malades », le Laboratoire de Gargenville s'est orienté vers la prise en compte de Cu, Cu/CEC, calcaire total, comme données les plus explicatives.

Diverses expérimentations ont été poursuivies dans d'autres régions, en terres de Groies, dans l'Indre, avec des effets spectaculaires sur blé, pouvant atteindre + 20 à + 30 q/ha.

Ces faits apparaissent comme assez significatifs des problèmes d'oligo-éléments dans ce pays. Dans la pratique, il faudrait réaliser une meilleure diffusion des connaissances théoriques relatives aux oligo-éléments et aussi des constatations faites dans le passé dans d'autres régions (exemple du Massif Armoricain). Enfin les références expérimentales sont insuffisantes.

LE BORE

ETAT DU PROBLEME EN 1970.

COPPENET (1970) rappelait les principales étapes de la connaissance des déficiences en bore : elle est connue en France depuis environ 50 ans sur betterave sucrière sous le nom de maladie du cœur et elle fut ensuite décelée il y a 30 ans sur arbres fruitiers par TROCMÉ et sur vigne par BRANAS.

GOUNY et CORNILLON (1970) relevaient des problèmes de bore en plusieurs points du Sud-Est, les sols acides ayant les teneurs en B les plus faibles, avec de faibles teneurs dans le végétal (10 à 20 ppm). Les sols neutres ou alcalins sont mieux pourvus et les déficiences en bore y sont rares. Une relation entre la teneur en bore soluble eau et la matière organique a été proposée.

Dans l'Est du Bassin Parisien, en région betteravière, DUTIL (1970) rappelait l'importance de la fertilisation boratée, de l'ordre de 20 à 25 kg/ha de borate de soude, cependant que l'on notait que sur les sols recevant tous les 3 ou 4 ans de tels apports la teneur du sol en bore ne s'améliorait pas.

Pour l'arboriculture fruitière, M^{me} HUGUET (1970) rappelait que le rythme du transfert de cet élément est très intense dans les bourgeons des arbres fruitiers et que le bore est sans doute l'oligo-élément dont la carence est la plus fréquente chez les plantes pérennes. Les symptômes sont classiques mais il est souvent utile de se baser sur un diagnostic analytique de la plante (teneurs normales de l'ordre de 25 à 50 ppm, déficience probable au-dessous de 20 ppm). Les traitements consistent aussi en apports de sels boratés au sol (20 à 30 kg/ha) ou sous forme de pulvérisations sur frondaison. Cet auteur rappelait également que l'on attribue souvent à la déficience en bore les anomalies de liège qui concernent les fruits à pépins.

LES ACQUISITIONS POSTERIEURES A 1970 CONCERNENT LE BORE DANS LE SOL ET LE BORE DANS LA PLANTE.

Le bore dans le sol.

On doit à J. MAURICE, de Quimper, d'importants travaux sur le bore dans le sol, dans le cas du Massif Armoricain. Cet auteur a d'abord étudié la distribution du bore dans les fractions granulométriques de divers sols (MAURICE, 1971). La teneur en bore de l'argile présente une certaine constance vers 60 ppm mais ne participe pas d'une manière importante à la teneur en bore du sol. Au contraire, les limons et les sables voient leurs teneurs en B très corrélées avec celles du sol.

J. MAURICE (1973) a ensuite étudié la corrélation entre le bore total des sols cultivés et le bore total des roches du Massif Armoricain. La distribution du bore est liée à la nature des roches (les grès et les granites sont nettement moins bien pourvus que les schistes) et secondairement à l'âge de la mise en place des roches. En ce qui concerne les sols, l'éventail des teneurs est plus étroit et la variabilité moins grande que pour les roches. Mais il y a une forte corrélation entre les teneurs en bore des sols et celles des roches.

Le bore extractible à l'eau est cependant très faible par rapport au bore total des sols. Les facteurs les plus déterminants du bore soluble à l'eau des sols étudiés seraient les matières organiques, puis le pH (MAURICE, 1977).

CORNILLON (1971) a étudié l'extraction de certaines formes de bore du sol en comparant l'extraction à l'eau pure à l'extraction avec une solution de glucose à l'ébullition. Cela devait permettre de mettre en évidence la partie des réserves boratées du sol réagissant avec la fonction hydroxyle, et susceptible d'être plus disponible pour les plantes.

Enfin, étudiant le comportement du bore en sol de craie, BALLIF et DUTIL (1980) ont montré que les pertes en bore assimilable étaient très importantes en deux ans après l'apport et conclu qu'il convenait de limiter les apports aux cultures de l'assolement les plus sensibles, c'est-à-dire la betterave et la luzerne. Les apports ne sont justifiés que lorsque la teneur du sol en bore soluble-eau (rapport sol/solution = 1/2) est assez nettement inférieure à 1 ppm (par exemple 0,5 ppm), valeur considérée comme optimale.

Un seuil de carence de 0,3 ppm est souvent adopté pour B soluble eau à 100°, si le pH est compris entre 5,5 et 6,5.

Le bore et les plantes.

D. BLANC (1975) s'est intéressée au risque de manifestation de déficience en bore de l'œillet américain en étudiant l'influence de l'apport de bore en quantités variables sur le rendement, la composition minérale des pousses axillaires et sur la répartition du bore dans les différentes parties de la plante. La teneur optimale en B des pousses axillaires en début de culture serait de 50 ppm. D'autre part, la nutrition calcique interfère sur les niveaux en bore et si $Ca/B > 450$ il y a un déficit B par rapport à Ca, alors qu'il y a un excès B si $Ca/B < 250$.

Malgré diverses manifestations de grave sécheresse au cours de la dernière décennie, la littérature ne semble pas avoir signalé une plus forte fréquence de la déficience en bore sur arbres fruitiers.

Par contre, sur tournesol, la déficience en bore a été détectée il y a environ deux ans par le C.E.T.I.O.M. Les symptômes ont été décrits sous le terme de « grillures » du tournesol : des ponctuations chlorotiques sur les feuilles évoluent en zones de nécroses à partir de la base de la feuille. Les feuilles les plus jeunes se recroquevillent. On note également un brunissement de la moelle de la tige sous le capitule. Les dosages de B dans les feuilles ont confirmé qu'il s'agissait bien d'une déficience B (14 ppm dans les pieds malades contre 36 ppm dans les sains).

Le tournesol présente sans doute un besoin élevé en bore mais on dispose de peu d'information sur la quantité de B nécessaire dans les diverses parties de la plante. En Afrique du Sud, pays où la déficience en B est très fréquente sur tournesol, on estime

que la première feuille adulte du haut, au stade floraison, est un bon échantillon pour mesurer la nutrition B du tournesol et la teneur critique y serait de l'ordre de 35 ppm. On considère dans ce pays que la fertilisation boratée du tournesol devrait y être généralisée sauf dans les situations où les analyses foliaires montreraient que ce n'est pas nécessaire.

Le problème éventuel du bore sur tournesol en France est lui aussi symptomatique. Il résulte du développement considérable d'une culture assez sensible sur des terroirs où l'on ne cultivait pas de plante sensible, si ce n'est peut être la luzerne.

LE MOLYBDENE

Le plus petit des oligo-éléments occupait une place très restreinte dans les annales de 1970. C'est vers 1960 que les premiers symptômes de déficience Mo furent observés en France, sur choux-fleurs cultivés en sols acides dans le Sud-Est. Ce sont surtout les agronomes du Bas Rhône-Languedoc qui avaient étudié la carence Mo sur cultures maraîchères installées sur de nouveaux périmètres irrigués, en sols acides.

C'est donc surtout dans le Sud-Est que les carences Mo ont été observées et, en majorité, sur sols fersallitiques de la Costière du Gard, sur melons, choux-fleurs et sur les essais d'implantation de luzerne.

Ensuite, la déficience a été reconnue en Crau, dans le Vaucluse, en Tarn-et-Garonne, dans le Gers. Il semble en fait qu'elle soit très difficile à détecter en dehors des cultures précédentes.

Les teneurs du sol en Mo disponible allaient de 0,10 à 0,15 ppm en Costière et étaient de l'ordre de 0,25 ppm dans d'autres sites.

La thérapeutique consistait en pulvérisations de molybdate d'ammonium.

L'amélioration des connaissances en ce qui concerne le molybdène passe incontestablement par le développement de la détermination fiable de cet élément dans les sols et les plantes. Les quantités à doser sont en effet très faibles. L'ordre de grandeur du seuil de carence dans les sols est de 0,15 ppm (Mo extrait par l'oxalate d'ammonium à pH 3,3, si le pH du sol est < 6,0), tandis que dans les feuilles de choux-fleurs et de luzerne déficientes, la teneur serait de l'ordre de 0,10 ppm.

DUVAL (1971), en matière de dosage de Mo dans les plantes, a préconisé la méthode colorimétrique au thiocyanate (calcination entre 600 et 700° et mise en solution du molybdène par HCl). Le complexe molybdique est extrait par l'acétate de butyle. La méthode décrite est sensible, reproductible, simple et assez rapide. Le même auteur (1970) a effectué de nombreuses déterminations de Mo dans les plantes fourragères mais dans un but d'étude des risques de toxicité.

Les acquisitions de la dernière décennie se situent pratiquement toutes dans le cadre de l'interaction soufre × molybdène.

Elle a été étudiée par JUSTE et al. (1971) sur une culture de luzerne en vases de végétation sur sol argilo-calcaire des Charentes insuffisamment pourvu en S et Mo, l'essai comportant entre autres 4 traitements S × Mo (200 g/ha Mo et 200 kg/ha S) et les principaux résultats figurent au tableau 4.

TABLEAU 4. — Interaction Soufre × Molybdène sur luzerne (Charente).

TABLE 4. — Sulfur x Molybdenum interaction on Alfalfa (Charente).

	Indices de production m.s.		ppm Mo		S %		N %	
	S0	S1	S0	S1	S0	S1	S0	S1
Mo0	100	141	0,22	0,12	0,29	0,93	2,82	2,70
Mo1	167	531	5,93	0,62	0,21	0,44	3,33	4,13

L'interaction S \times Mo est particulièrement positive. Le soufre a exercé une action très dépressive sur l'absorption du molybdène et réciproquement. Il en est résulté que les meilleurs résultats correspondaient très nettement à S1 + Mo1.

L'association du soufre et du molybdène est également bénéfique en ce qui concerne la qualité de la luzerne qui voit s'élever sa teneur en N et diminuer sa teneur en Mo (DELAIS et al., 1973 ; et JUSTE, 1975).

Ce problème a également été abordé par MENET et al. (1974) dans le cadre du problème de l'implantation des luzernières sur sols de rendzines de Charentes avec préconisation de l'apport associé de S (150 kg/ha) et de Mo (à la dose de 100 g/ha). DUTIL (1977) a adopté les mêmes conclusions en Champagne en ce qui concerne les apports simultanés de S et de Mo, en préconisant de ne pas dépasser 100 g/ha Mo afin de ne pas risquer de dépasser 3 ppm Mo dans les fourrages, seuil jugé toxique pour les animaux.

Les essais de la Station d'agronomie de M.N.R.A. à Bordeaux, cités ci-dessus, comportaient également des apports de crude ammoniac (amendement riche en certains oligo-éléments) et d'un mélange d'oligo-éléments, qui ont présenté des effets positifs très nets. Mais les auteurs n'ont pas pu identifier un oligo-élément autre que le Mo qui aurait pu exercer une action comparable à celle de Mo sur le fonctionnement des nodosités. L'hypothèse d'un effet possible du cobalt (présent dans les produits expérimentés) a été avancée et des essais d'interactions S \times Mo \times Co ont été réalisés sur luzerne soit en pots par la Station de Châlons-sur-Marne, soit au champ en Charente et dans la Marne avec un produit de la S.C.P.A. associant molybdène et cobalt. Des résultats positifs ont été obtenus mais la synergie éventuelle Mo \times Co reste encore à démontrer.

Dans un domaine très différent, il est apparu que le « leaf burn » des agrumes en Corse était en relation étroite avec une carence en molybdène. A.-M. BLONDEL et D. BLANC (1975) avaient montré l'intérêt de la méthode de mesure « in vivo » de l'activité de la nitrate réductase pour diagnostiquer la carence en molybdène. La détermination simultanée de l'activité de la nitrate réductase et de la teneur en nitrates des feuilles a permis d'attribuer à une carence en molybdène les brûlures foliaires observées dans les jeunes vergers de clémentiniers. L'accumulation de nitrates, dans les feuilles des arbres malades, est due à une faible activité de la nitrate réductase en raison d'une carence Mo. D'autre part, rejoignant un peu le problème de la luzerne, les apports d'engrais sulfatés ont aggravé indirectement le « leaf burn » en accentuant la carence en Mo (CASSIN et al. 1981). Les feuilles saines dosaient 152 ppm N (NO_3) et 0,03 ppm Mo et les feuilles « brûlées » 1.000 à 2.000 ppm N (NO_3) et 0,02 ppm Mo.

Des résultats intéressants ont donc été obtenus depuis dix ans sur les problèmes du molybdène.

Les figures 11a et 11b ont trait aux teneurs en molybdène enregistrées au cours de deux enquêtes S.C.P.A. et montrent assez bien la diversité des conditions de sols à cet égard :

Dans le cas des sols à fraisiers, les teneurs seraient un peu faibles à correctes mais en présence de pH nettement acides donc défavorables à l'assimilabilité de Mo.

Dans le cas des sols du Ribéracois, au contraire, les teneurs sont très faibles mais les conditions de pH sont les plus favorables à l'assimilabilité.

Il est évident que l'on n'est pas réellement en mesure d'interpréter avec sécurité ces deux distributions de teneurs en Mo.

CONCLUSIONS

En 1970, COPPENET concluait ainsi sa revue des problèmes d'oligo-éléments : « Il est certain qu'à ce jour, la science agronomique de notre pays est armée pour résoudre, en cette matière, les problèmes principaux posés aux agriculteurs...

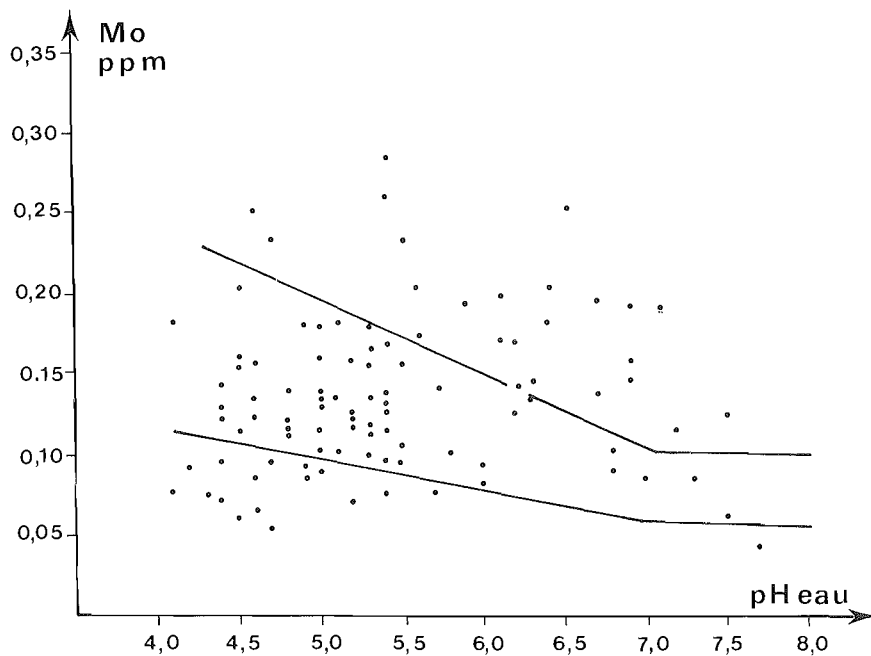


FIGURE IIa. — Mo dans les sols à fraisiers (Dordogne).
 FIGURE IIa. — Mo in strawberries soils (Dordogne).

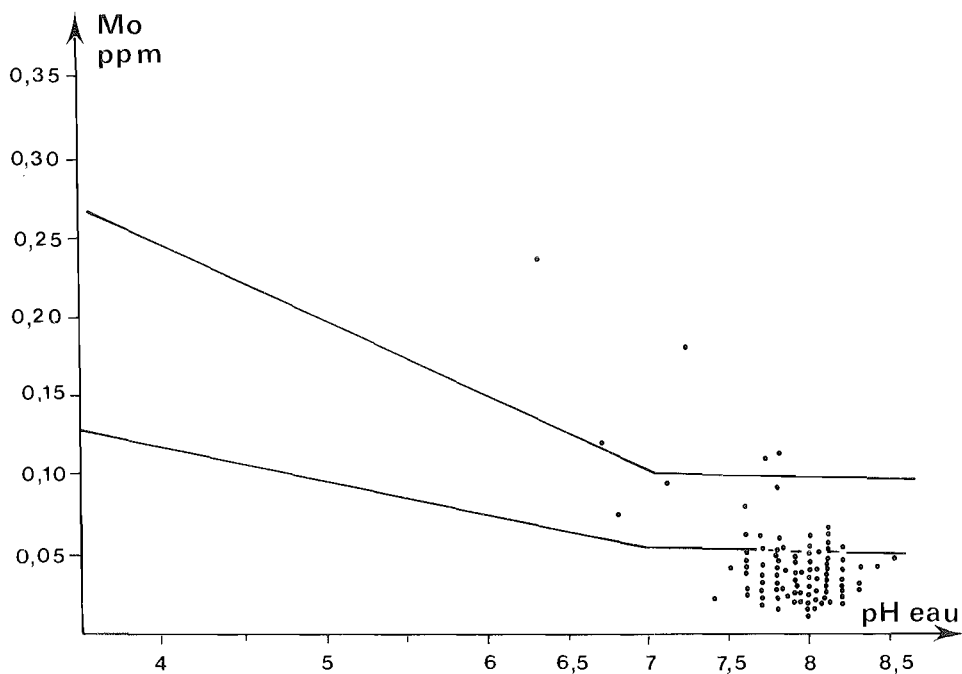


FIGURE IIb. — Mo dans les sols du Ribéraois (Dordogne).
 FIGURE IIb. — Mo in «Ribéraois» soils (Dordogne).

Nous ne prétendons pas toutefois qu'il n'existe pas de lacune ; les terroirs de France sont nombreux et variés, les productions très diversifiées... autant de causes capables de faire apparaître de nouveaux accidents imputables aux éléments mineurs. »

Cette sage conclusion reflète assez bien ce qui s'est passé depuis. La plupart des problèmes posés ont pu être solutionnés mais il n'y a pas eu de véritable programme d'études. Il s'est cependant dégagé une sorte de politique de l'oligo-fertilisation.

La fertilisation oligo-minérale se développe peu à peu en France, grâce aux progrès dans la connaissance des problèmes d'oligo-éléments dans les sols, grâce à un meilleur dépistage des cas de carences, grâce aux résultats enregistrés avec tels ou tels apports.

Elle ne s'applique théoriquement que dans les cas de carence reconnue ou de sub-carence supposée sur une certaine culture et dans certaines conditions de milieu. Il y a une tendance à ce que les apports d'oligo-éléments soient moins considérés comme s'apparentant à une action phytosanitaire et de plus en plus traités comme des actes de fertilisation.

Dans le cadre des cultures à hauts rendements, on assiste depuis quelques années à une nouvelle conception de la fertilisation oligo-minérale. Dans certains systèmes intensifs, certains préconisent d'associer aux traitements phytosanitaires des applications foliaires d'oligo-éléments sous forme de cocktails. Le principe avancé est qu'il est souvent malaisé de dépister les subcarences en oligo-éléments qui peuvent être composites, passagères, mais qui seraient toujours dépressives sur les rendements. L'emploi régulier d'un engrais foliaire contenant les oligo-éléments essentiels permettrait d'éviter ces troubles physiologiques imprévisibles.

En général, en France, et pour le moment, faute de preuves expérimentales et de légitimation au plan physiologique, les agronomes sont plutôt opposés à la généralisation géographique de tels cocktails. Ils estiment, à juste titre, que la thérapeutique doit concerner une ou des carences ou subcarences bien détectées. Ils sont plutôt défavorables aux associations tous oligo-éléments dont il n'est pas prouvé que les effets vont s'ajouter, qu'il y aura des synergies.

Posant la question de savoir si le risque de carences en oligo-éléments est plus élevé en système intensif, COPPENET (1982) concluait qu'il y avait des facteurs favorables aux carences (amélioration génétique, chaulage, fertilisation P_2O_5 , blés à hauts rendements) et des facteurs plutôt défavorables.

Dans le moyen terme, en face d'une sorte de mode des oligo-éléments, et pour mieux la canaliser, il conviendrait de normaliser les méthodes de dosages des oligo-éléments dans les sols, de réaliser une meilleure couverture analytique des terroirs, d'améliorer le calibrage de ces tests sols grâce à la création d'un dossier expérimental un peu plus étoffé qu'actuellement.

SUMMARY

MICRONUTRIENT DEFICIENCIES IN PLANTS

(Research findings in France since 1970)

The object of this article is the survey of knowledge acquired in France since 1970, in the field of the diagnostic of micronutrients (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo) deficiencies on cultivated crops.

IRON

Since 1970, many studies have been published on iron chlorosis of fruit trees and vines. Concerning the physiological causes of chlorosis the most common opinion is that a change in roots metabolism is induced by HCO_3 ions or high pH values of medium, which reduces the transport of Fe from roots to aerial parts.

The factors of medium promoting the appearance of Fe chlorosis are better known: high levels of free CO_3Ca , HCO_3 ions, soil moisture, effects of incorporating in soil easily decaying organic matter, soil texture. The index IPC (« indice de pouvoir chlorosant »), which takes in account free CO_3Ca and easily extractable Fe, is a better test than free CO_3Ca alone. Iron chlorosis being a difficult deficiency to correct in orchards and vineyards, the most significant progress since 1970 concern the genetic control (particularly the method of « reversible » graftings on vine introduced by I.N.R.A. Bordeaux).

MANGANESE

The studies on manganese in soils and plants have not been very extensive during the last decade. However, some cases of Mn deficiencies are related on cereals, mainly on wheat, in different regions.

ZINC

With continued search Zn deficiency has been recognized in many areas in France, on a susceptible crop like corn and under such conditions as, low soil Zn, calcareous soils, high P fertility, compacted soil, cool temperatures in May, June.

Experimental S.C.P.A. results on corn are reported under typical soils conditions promoting Zn deficiencies: Zn trials with three levels of Zn metal and P x Zn factorial trials .

The main soil tests used for Zn in France are reviewed with the corresponding calibrations. Plant tissue analysis is also considered with a tentative of calibration of Zn concentrations from severe deficiency to adequacy. The Fe/Zn ratio in the plant could be a better index.

COPPER

In the recent four years, Cu deficiencies have been observed on cereals in the Center and Eastern regions of France. On wheat, the disease symptoms of « yellow tips » appeared but the disease is called « empty ears disease », because practically no grain is produced. Experiments have demonstrated a spectacular effect of 25 to 50 kg/ha SO_4Cu . The disease is observed on local areas with less than 1 ppm Cu in the soil (HCl 1/2 extract) and the risk is greater with high levels of organic matter (4 %). The symptoms can occur up to 2.5 ppm Cu.

BORON

Many research studies have been achieved during the last decade concerning boron in the soil: correlation between the B contents of the soils and the B contents of the rocks, distribution of soil B in the different mineral fractions of soils, correlation between the hot H₂O soluble B and organic matter and pH. A critical B level of 0.3 ppm is often adopted.

In plants, boron deficiency appears, since two years, on sunflower, due to the great extent of this crop in France.

MOLYBDENUM

Soils contain very minute amounts of Mo and it is analytically quite difficult to determine plant available Mo in soils. However a critical level of 0.15 ppm Mo extractable, by ammonium oxalate/oxalic acid solution at pH 3.3 is generally adopted. For the determination of Mo in plant tissue, a colorimetric thiocyanate method has been proposed.

The recent findings in agronomy concern the positive sulfur × molybdenum interaction observed on alfalfa. An amount of 100 g/ha Mo is generally recommended.

Molybdenum deficiency has been also noticed on citrus in Corsica, enhanced by fertilizers with a high S content.

CONCLUSION

Most of the problem appeared during the last decade have received practical solutions and we have an important empirical information. But we need an increase of the present level of research on the micronutrients because many questions are unanswered.

From the point of view, of development of use of micronutrients in French agriculture, the first problem is standardizing soil tests, developing micronutrients determination in many areas, improving the calibration of soil tests owing to a greater number of experimental results.

Bibliographie

- BALLIF J.-L., DUTIL P. (1980). — C.R. Acad. Agric. Fr. n° 5, 427-432.
 BERNHARD R., BINDRA A.S. (1972). — C.R. Acad. Agric. Fr. n° 58, 1520-1528.
 BERTRAND D. (1973). — C.R. Acad. Agric. Fr. n° 59, 507-516.
 BINDRA A.S., JUSTE C., BERNHARD R. (1972). — C.R. Acad. Agric. Fr. n° 58, 1513-1519.
 BLANC D. (1975). — Ann. Agron. 26 (4), 327-336.
 BLONDEL A.-M., BLANC D. (1975). — Ann. Agron. n° 3, 277-287.
 BRANAS J. (1974). — Viticulture, Ch. 2 - Maladies physiologiques. Chlorose. 626-635.
 CALLOT G., JAILLARD B. (1980). — « Relations sol-vigne Colloque franco-roumain », Bordeaux, 178-207.
 CASSIN P.-J., BLONDEL A.-M., MARCHAL J., FAVREAU P., PERRIER X., JUSTE C., BRUN P., LOSOIS P. (1981). — Proc. Int. Soc. Citriculture paper n° 234.
 COPPENET M (1982). — Les oligo-éléments et les éléments secondaires. La France Agricole, janvier, 27-28.

- CORNILLON P. (1971). — C.R. Acad. Agric. Fr. n° 57, 270-277.
- COURPRON C., JUSTE (1975). — Ann. Agron., 26, 215-227.
- DELAS J., JUSTE C., TAUZIN J. (1973). — C.R. Acad. Agric. Fr., n° 59, 1051-1058.
- DUPONT J., MORLAT R. (1980). — Conn. Vigne et Vin, 14, 1-18.
- DUTIL P. (1977). — Le point sur la fertilisation de la luzerne I.N.R.A. Châlons-sur-Marne.
- DUVAL L. (1970). — C.R. Acad. Agric. Fr. n° 56, 1195-1200.
- GAUTIER M. (1978). — Les oligo-éléments dans la fertilisation des vergers. L'arboriculture fruitière, 292, 12 p.
- GAY-BELLILE F. (1972). — La chlorose calcaire de la vigne. Progr. Agric. Vitic., 13, 326-332.
- HETIER J.-M., FARDEAU J.-C. (1977). — Science du sol, n° 4, 231-244.
- HUGUET C. (1977). — in « La fertilité du sol et la nutrition oligo-minérale des plantes ». Colloque franco-roumain, 67-76.
- HUGUET J.-G., PRADE J.-L. (1975). — C.R. Acad. Agric. Fr. 6, 208-216.
- JUSTE C., DELAS J., TAUZIN J. (1971). — C.R. Acad. Agric. Fr. 57, 1134-1139.
- JUSTE C., POUGET R. (1972). — C.R. Acad. Agric. Fr. 58, 352-357.
- JUSTE C. (1975). — in « Les acquisitions récentes sur les carences en oligo-éléments du sol aux ruminants ». Grenier de Theix, numéro spécial, 151-161.
- JUSTE C., POUGET R. (1977). — Vititechnique, n° 7, 8-9.
- JUSTE C., POUGET R. (1978). — La chlorose ferrique de la vigne en France. Symposium Vienne (Autriche).
- JUSTE C. (1980). — In « Relations sol-vigne, colloque franco-roumain », Bordeaux, 122-131.
- JUSTE C., POUGET R. (1980). — Science du Sol, n° 1, 37-44.
- LOUE A. (1983). — A paraître dans « L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales ».
- LUBET E., SOYER J.-P. et JUSTE C. (1983). — Appréciation de l'alimentation en zinc du maïs par la détermination du rapport Fe/Zn dans les parties aériennes du végétal. A paraître dans « Agronomie ».
- MAURICE J. (1971). — C.R. Acad. Agric. Fr. n° 57, 553-565.
- MAURICE J. (1973). — Ann. Agron., 24 (4), 465-475.
- MAURICE J. (1977). — C.R. Acad. Sci. 284, série D, 1627-1629.
- MAURICE J. (1977). — C.R. Acad. Agric. Fr. n° 16, 1135-1140.
- MENET M., TAUZIN J., DELAS J., JUSTE C. (1974). — Fourrages, 43-65.
- MEYER E., BRECHBUHLER C. (1975). — Vignes et Vins, n° 244, 14-17.
- MORLAT R. (1976). — Conn. Vigne et Vin, 10, 359-367.
- MORLAT R., DUPONT J., SALETTE J. (1980). — Ann. Agron., 31 (2), 219-238.
- MORLAT R., COURBE C. (1980). — in Colloque franco-roumain sur les relations sol-vigne, Bordeaux, 150-177.
- POUGET R., DELMAS J., BOUVARD J. (1971). — Sciences et Techniques de la Vigne, 2, 431-435.
- POUGET R., JUSTE C. (1972). — Conn. Vigne et Vin, 4, 359-364.
- POUGET R., OTTENWALTER M. (1973). — Ann. Amélior. Plantes, 23, 347-356.
- POUGET R. (1974). — Conn. Vigne et Vin, 8, 305-314.
- POUGET R., (1977). — Bull. O.I.V., 556, 387-397.
- POUGET R., OTTENWALTER M. (1978). — Conn. Vigne et Vin, 3, 167-175.
- POUGET R. (1980). — in « Relations sol-vigne, colloque franco-roumain », Bordeaux, 113-121.
- TRIBOI E., FARDEAU J.-C. (1977). — « La fertilité du sol et la nutrition minérale des plantes ». Colloque franco-roumain, 143-151.

