



TRANSFERT DE TECHNOLOGIE EN AGRICULTURE

MAPM/DERD

• Septembre 2007 •

PNNTA

Fertilisation Minérale des Cultures

Les éléments minéraux secondaires et oligo-éléments

Introduction

Les plantes prélèvent les éléments minéraux du sol pour produire les composés organiques. Il est établi que plusieurs éléments sont nécessaires pour le fonctionnement normal de la machine biochimique de la plante. Les éléments nutritifs doivent être présents sous une forme assimilable pour que les végétaux puissent les absorber. La fertilisation minérale a pour but d'apporter le complément nécessaire à la fourniture du sol en vue de répondre aux besoins physiologiques des plantes pour une croissance et un développement optimums.

De nos jours, on connaît plus de 100 éléments chimiques; mais seulement 17 sont considérés essentiels en raison de leur importance pour la croissance et le développement des plantes. Ces éléments sont classés en trois catégories: les éléments essentiels majeurs (Azote, Phosphore et Potassium); les éléments secondaires (Calcium, Magnésium et Soufre); et les oligo-éléments (Fer, Zinc, Manganèse, Cuivre, Bore, Molybdène, Chlore et Nickel).

Parmi ces 17 éléments chimiques essentiels, le carbone, l'hydrogène et l'oxygène sont prélevés à partir de l'air et de l'eau. Les 14 autres éléments sont normalement absorbés par les racines de la plante à partir du sol.

Dans ce bulletin, nous allons traiter des éléments minéraux secondaires et des oligo-éléments, notamment les facteurs et conditions de disponibilité et d'absorption, les problèmes de carence ainsi que les conséquences pratiques pour une fertilisation adéquate.

MINÉRAUX SECONDAIRES

Le calcium (Ca)

Rôle du calcium

Le calcium a un rôle déterminant au cours des principales phases de la vie du végétal. Sa présence dans le suc cellulaire est indispensable pour le développement de la plante. Il est impliqué dans la division cellulaire et joue un rôle majeur dans le maintien de l'intégrité de la membrane.

Symptômes de carence et d'excès

Les symptômes visuels de carence sur les feuilles sont des gaufrages ou des déchirements spontanés du limbe. Sur fruit, une mauvaise nutrition calcique est la cause de maladies physiologiques comme la nécrose apicale de la tomate. Il faut

noter aussi qu'une carence en calcium réduit la quantité de protéines produites, la croissance étant rapidement stoppée et la sensibilité aux agents pathogènes est augmentée.

Sous forme active, l'excès de calcaire provoque la chlorose ferrique par inhibition de l'absorption du fer et du manganèse dont le résultat est le jaunissement et à l'extrême la nécrose du feuillage.

Pratique de la fertilisation calcique

Pour qu'un sol assure une alimentation suffisante des plantes en calcium, il doit contenir au moins 3 ‰ de CaO. Dans les sols calcaires, cette teneur est nettement dépassée et l'alimentation calcique est satisfaisante. Dans les sols acides, les amendements calcaires ou calco-magnésiens, qui servent à relever le pH, apportent suffisamment de calcium pour satisfaire les besoins.

L'augmentation du pH du sol d'une unité nécessite un apport d'environ 1,5 t/ha de CaO en sols sableux, 2,5 t/ha en sols limoneux et 4 t/ha en sols argileux. L'apport est à fractionner sur plusieurs années, et l'épandage s'effectue bien avant l'installation de la culture sur un sol sec.

Sur une culture en place, l'apport foliaire constitue la seule possibilité pratique d'approvisionnement adéquat en calcium. On peut ainsi apporter le nitrate de calcium ou le chlorure de calcium par pulvérisation foliaire en s'assurant que la concentration des solutions utilisées ne dépasse pas 2% pour éviter les dégâts sur feuilles. Cependant, la considération de la qualité exclue la pulvérisation de la forme nitrate sur les fruits comme la pomme.

Le magnésium (Mg)

Rôle du magnésium

Le magnésium est très important dans la plupart des fonctions vitales des plantes. La chlorophylle, pigment vert de la plante, est riche en magnésium. Ce dernier participe à la formation et à la mise en réserve des sucres, hydrates de carbone et vitamines.

Symptômes de carence et d'excès

Le magnésium est très mobile dans la plante, donc en cas de carence il peut être transloqué à partir des feuilles les plus âgées vers les plus jeunes.

Les plantes carencées en cet élément présentent des chloroses plus ou moins vert-jaune entre les nervures des feuilles âgées, suivies parfois de nécrose. Les feuilles restent souvent

- Calcium et magnésium..... p.1
- Soufre, fer et cuivre..... p.2
- Zinc et manganèse..... p.3
- Bore, molybdène, chlore et nickel..... p.4

SOMMAIRE

n° 156

Fertilisation des cultures

vertes à la périphérie. Les extrémités et les bords sont en partie bombés vers le haut.

Pratique de la fertilisation magnésique

L'appréciation de la teneur en magnésie se fait souvent en fonction de la richesse en potassium. Les conditions idéales pour une bonne alimentation en magnésie sont appréciées par le rapport K_2O/MgO (en %) = 1 ou bien K/Mg (en meq/100 g) = 1/2. En terre mal pourvue en magnésie, il faut relever le niveau magnésien du sol jusqu'à la valeur d'entretien (Tableau 1).

Les carences en magnésie pourront être corrigées différemment selon le type de sol:

- En sol calcaire: par des apports sous forme de sulfate de magnésie;
- En sol acide: par des apports de chaux magnésienne ou dolomie (carbonate de calcium et de magnésium).

Les engrais à base de magnésie sont faciles à apporter. Les formes solubles dans l'eau peuvent être placées à la surface du sol, la pénétration dans le sol vers les racines se fera avec le mouvement de l'eau.



Symptômes de carence en calcium (nécrose apicale, tomate)



Symptômes de carence en magnésium (vigne)

Le soufre (S)

Rôle du soufre

Le soufre est absorbé à partir du sol sous forme d'ion SO_4^{2-} . Il peut être absorbé à partir de l'air sous forme de dioxyde SO_2 , quand l'atmosphère est riche en soufre provenant des sources industrielles.

Le soufre est un constituant de trois acides aminés (cystine, méthionine et cystéine) et par conséquent il est nécessaire pour la synthèse des protéines. Il est également essentiel pour la formation des nodules dans les racines des légumineuses.

Certaines plantes, comme l'ail et l'oignon, ont des besoins importants en soufre étant donné que celui-ci rentre dans la composition de leurs huiles et il est responsable de leur odeur caractéristique.

Symptômes de carence et d'excès

Le soufre est considéré comme un élément peu mobile dans la plante. Les effets de sa carence se manifestent d'abord sur les jeunes organes qui présentent une chlorose liée à une diminution de la teneur en chlorophylle.

Les symptômes de carence se manifestent par une couleur vert-pâle ou jaunâtre des jeunes feuilles. Les nervures sont souvent plus claires que le reste de la feuille et la plante est d'un vert clair. On observe aussi un dessèchement comme pour une carence en azote. Les racines sont nombreuses, blanches et ramifiées. Les plantes sont chétives, petites et à croissance retardée.

Pratique de la fertilisation soufrée

Dans les sols riches en matière organique et en argile, les fournitures du sol par la minéralisation peuvent satisfaire les besoins des cultures en soufre. En sol filtrant et pauvre en matière organique, le soufre risque de limiter la production, surtout si la fumure N-P-K est apportée par des engrais ne contenant pas de soufre tels que l'ammonitrate, le superphosphate triple et le chlorure de potasse.

Les apports de soufre peuvent être faits en sol calcaire ou acide, avec des engrais ou des amendements contenant du soufre, tels que le sulfate d'ammoniaque, le sulfate de potasse et le superphosphate simple.

LES OLIGO-ELEMENTS

Généralités

Les oligo-éléments sont des micro-éléments dont la plante a besoin en petites quantités. Les plus importants sont au nombre de huit: Le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le bore (B), le molybdène (Mo), le chlore (Cl) et le nickel (Ni).

On distingue deux types de déficience due aux oligo-éléments:

- La déficience absolue, originelle ou vraie, due à l'absence presque totale de l'élément en réserve dans le sol. Dans ce cas, il suffira d'ajouter au sol l'élément qui fait défaut pour que la carence disparaisse.
- Les carences conditionnées, relatives ou induites, généralement observées dans les conditions de la pratique agricole. Dans ce cas, l'élément considéré ne manque pas dans le sol, mais il est rendu inassimilable; ce blocage est souvent dû à un pH élevé, à des antagonismes

Tableau 1. Valeurs d'entretien en magnésium pour différents types de cultures et de richesse du sol en argile (SCPA, 1989)

Taux d'argile	Grandes cultures		Cultures intensives de plein champ (cultures perennies)		Cultures protégées (niveaux maxima)	
	MgO (%)	Mg (meq/kg)	MgO (%)	Mg (meq/kg)	MgO (%)	Mg (meq/kg)
10 %	0,07 - 0,09	3,5 - 4,5	0,09 - 0,12	4,5 - 06	0,12	6
20 %	0,08 - 0,12	4 - 6	0,12 - 0,15	6 - 7,5	0,15	7,5
30 %	0,10 - 0,13	5 - 6,5	0,13 - 0,18	6,5 - 9	0,17	9
> 40 %	> 0,15	> 7,5	> 0,20	> 10	0,20	10

d'ions, à un taux élevé de matière organique ou à des pertes dues au lessivage.

Le Fer (Fe)

Rôles physiologiques

Le fer est l'oligo-élément qui est nécessaire en plus grande quantité. Le fer est un constituant de plusieurs enzymes à hème et sans hème. L'hème étant un complexe qui forme le groupement prosthétique de plusieurs enzymes: catalase, peroxydase et cytochrome oxydase.

Déficience

La déficience en fer peut être induite lorsque le pH du sol est élevé, dans des situations de mauvaise aération, ou quand on a des niveaux élevés de zinc, de manganèse et de calcaire. Les symptômes varient avec l'âge de la feuille, la sévérité de la déficience et parfois avec les conditions du milieu. Les symptômes de carence en fer se caractérisent par la couleur vert-clair des jeunes feuilles.

Les céréales sont considérées par plusieurs auteurs assez insensibles à la déficience de fer. L'ordre de sensibilité décroissante est comme suit:

Avoine > orge > blé > seigle

Comme plantes sensibles, il y a l'haricot, la tomate et le chou-fleur. Le lupin est la légumineuse la plus sensible à la chlorose calcaire.

Pour la vigne, la chlorose ferrique frappe surtout les jeunes plantations de deux à trois ans. Le classement des espèces arboricoles selon leur sensibilité décroissante est comme suit:

Vigne > cerisier > pêcher > poirier

Correction

Plusieurs pratiques sont proposées pour corriger la carence en fer: Apport direct au sol, pulvérisation foliaire ou fertigation. A cet effet, le tableau 2 propose les principales sources de fer. L'utilisation du nitrate ferrique liquide pour la pulvérisation foliaire en présence d'un agent capable de pénétrer dans les cellules de la plante est intéressante.

Par ailleurs, l'apparition de chélates de fer a ouvert une nouvelle voie dans le domaine de la correction de la chlorose ferrique. Ces chélates peuvent être incorporés au sol ou pulvérisés directement sur la plante. Dans le cas de l'application des chélates de fer au sol, il faut tenir compte de l'effet du pH. Si on a un pH alcalin en présence de fortes concentrations de Ca^{2+} dans le sol, les chélates pourraient devenir insolubles, et ce par la formation des complexes Ca-chélates et la précipitation du fer sous forme d'oxydes de fer. Dans les sols à pH élevé, les chélates EDDHA sont les plus convenables. Dans les sols acides, le complexe Fe-DTPA est le plus efficace.

Vu que les chélates utilisés pour la correction de la déficience en fer sont coûteux, ils sont non justifiés sur grandes cultures à revenu par hectare moyen ou faible. Un bon travail du sol et un choix approprié des cultures peuvent limiter la chlorose. On suggère alors l'enfouissement de la matière organique, d'un engrais ammoniacal, de sulfate ou de pyrite pour réduire le pH du milieu. Egalement, un bon travail du sol visant la réduction du compactage et l'amélioration du drainage peuvent diminuer le risque de la chlorose.

Le Cuivre (Cu)

Rôles physiologiques

L'implication du cuivre dans la chaîne photosynthétique a été démontrée par plusieurs auteurs. En effet, 70 % du cuivre disponible dans la plante est localisé dans les chloroplastes. Le cuivre intervient aussi dans la formation de la lignine qui est parmi les éléments qui confèrent à la cellule son élasticité ainsi que sa stabilité.



Symptômes de carence en soufre (colza)



Symptômes de carence en fer (tomate)



Symptômes de carence en cuivre (orge)

Tableau 2. Les principales sources d'engrais de fer

Sources d'engrais	Formule	Teneur en Fer (%)
Sulfate ferreux	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	19
Sulfate ferrique	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 4H_2O$	23
Oxyde ferreux	FeO	77
Oxyde ferrique	Fe_2O_3	69
Nitrate de fer	$Fe(NO_3)_2$	--
Chélate	NaFe EDTA	5 à 14
Chélate	NaFe HEDTA	5 à 9
Chélate	NaFe EDHA	6
Chélate	NaFe DTPA	10
Polyflavonoïdes de fer	----	9 à 10
Lignosulfonates de fer	----	5 à 8
Methoxypropylpropane de fer	Fe MPP	50 g/kg

Par ailleurs, l'implication du cuivre dans le processus de fixation biologique de l'azote et dans la régulation de l'absorption du manganèse. En présence d'une carence en cuivre, l'absorption de manganèse s'accélère conduisant ainsi à la toxicité de la plante. Ce phénomène s'observe surtout dans les sols acides.

Déficience

Le cuivre est un élément dont la plante a besoin en faibles quantités dans une fourchette de 25 à 150 g/ha. La carence en cuivre est souvent rencontrée dans les sols organiques et expliquée par le fait que le cuivre est plus rapidement adsorbé par la matière organique du sol que les autres éléments. Un pH élevé peut aussi induire un stress nutritionnel en cuivre, la déficience en cuivre est observée au-dessus du pH 7.

La carence en cuivre a été signalée après une fertilisation azotée intense. Ceci est dû au fait que la fertilisation azotée retarde la sénescence des feuilles âgées. La translocation du cuivre à partir de ces feuilles est diminuée. Un antagonisme entre zinc et cuivre a été décelé. Les symptômes de carence en cuivre se manifestent d'abord sur les jeunes feuilles, en raison de la faible mobilité du cuivre.

Les céréales, à l'exception du seigle, sont considérées les plus sensibles, suivies des légumineuses notamment la luzerne et le trèfle violet. Sur céréales, la déficience en cuivre est observée d'abord sur les bouts des feuilles, au stade tallage. Le bout devient blanc et les feuilles sont étroites et déformées. La croissance des entre-

nœuds est affectée, et on observe une réduction de l'inflorescence. Dans les cas moins sévères, l'inflorescence peut avoir lieu mais le développement des épis est affecté, et quant ils sont formés, ils prennent une coloration violette.

Chez les graminées fourragères cultivées sur sols carencés en cuivre, le symptôme de déficience se manifeste sous forme de "bout blanc" des jeunes feuilles.

Concernant les arbres fruitiers, les extrémités des rameaux sont dénudées et desséchées. Sur pommier et poirier, la déficience en cuivre débute par le brunissement des extrémités des pousses en croissance active. Parmi les arbres fruitiers, les agrumes sont les plus sensibles à cette carence. Le pommier, l'abricotier, l'olivier et le palmier sont de bons indicateurs de la déficience en cuivre.

Correction

L'apport peut se faire par incorporation au sol (en bandes ou en plein) ou par pulvérisation foliaire. Le cuivre est faiblement lessivé dans le sol; donc une application de base préventive permettra de couvrir les besoins de la plante en cuivre. L'apport des engrais incorporés au sol est plus efficace que les applications foliaires. En raison de la forte adsorption du cuivre par les colloïdes du sol, les doses à apporter doivent être supérieures aux prélèvements pour assurer une meilleure alimentation en cuivre.

Le sulfate de cuivre (CuSO_4) est la forme minérale la plus utilisée pour corriger la déficience en cuivre. On recommande le mélange de CuSO_4 avec la terre pour un meilleur contact avec la racine. Une seule application de 1 à 10 kg Cu/ha est souvent adéquate dans les sols minéraux. Des teneurs plus élevées sont parfois nécessaires dans les sols organiques.

Les doses de cuivre à appliquer par voie foliaire pour corriger la déficience vont de 0,09 à 4 kg Cu/ha sous forme de CuSO_4 . Il est recommandé de procéder à une pulvérisation foliaire de 2,2 kg de cuivre sous forme de CuSO_4 dans 280 litres d'eau par hectare pour corriger la carence en cuivre sur maïs, soja et blé. Par ailleurs, le cuivre est un élément très phytotoxique et qui peut déprimer la croissance; il convient donc de l'utiliser avec précaution. Le tableau 3 propose les principales sources de cuivre.

Le zinc (Zn)

Rôles physiologiques

Élément indispensable dans le métabolisme de la plante, le zinc est l'activateur de l'enzyme anhydrase carbonique, enzyme essentielle pour l'utilisation de l'acide carbonique.

Le zinc est un activateur de plusieurs autres métallo-enzymes, c'est le cas des déshydrogénases en particulier, la déshydrogénase de l'acide glutamique, la déshydrogénase de l'acide lactique et la déshydrogénase de l'alcool, ainsi que certaines protéases et peptidases.

De même, le zinc contrôle la synthèse de l'acide indolacétique qui est un régulateur de croissance très important pour la plante, et augmente la résistance des plantes aux maladies fongiques.

Déficience

Le zinc étant caractérisé par une adsorption élevée, il est fortement lié au complexe du sol sous la forme Zn^{2+} , ZnCl ou Zn(OH)^+ . Sa mobilité et sa concentration sont très faibles.

Le pH est considéré le facteur le plus déterminant dans la déficience relative du zinc, notamment lorsque la teneur du zinc dans la solution du sol est faible. Le pH influence la mobilité et la concentration du zinc dans la solution du sol. La mobilité du zinc dans la solution du sol dimi-

nue avec l'augmentation de pH du sol. Il a été également démontré que l'acidification du milieu rendant le pH de 6,5 à 5,3 augmente l'assimilation de zinc de 50 %.

La déficience en zinc a un effet négatif sur la fructification et le développement embryonnaire; peu de graines sont formées et les fruits sont de calibre médiocre.

Les symptômes de carence en zinc chez les monocotylédones, et particulièrement chez le maïs, se caractérisent par l'apparition des bandes chlorotiques vert-jaune pâle et souvent blanches de part et d'autre de la nervure centrale des feuilles. Si la carence persiste, les bandes se nécrosent. En cas de déficience grave, les jeunes feuilles prennent une couleur blanche ou jaune claire; c'est la maladie de "white bud" ou bourgeon blanc.

Le symptôme typique chez les arbres fruitiers est la disposition des feuilles en rosettes. Des petites feuilles étroites, tachetées et serrées sont formées à la fin des nouvelles pousses; aussi appelée maladie de "little leaf". La déformation et la chute prématurée des feuilles ainsi que la déformation des fruits sont le résultat de l'insuffisance de l'auxine suite au manque de zinc.

Chez les agrumes, les signes les plus typiques sont des malformations, un aspect chlorotique qui se traduit par une marbrure jaune crème sur un fond vert foncé; c'est la maladie de "bottle leaf" qui caractérise les citrus.

Correction

L'absorption du zinc par les plantes ne dépasse guère 0,5 Kg/ha/an. Dans la pratique, la carence en zinc est facilement corrigée par pulvérisation foliaire ou par apport au sol. Les apports au sol sont plus efficaces pour la correction de cette déficience et ne peuvent être substitués par la pulvérisation foliaire si la déficience est grave. Le sulfate de zinc (ZnSO_4) est largement utilisé en raison de sa grande solubilité. L'oxyde de zinc (ZnO) est également efficace si sa granulométrie est fine. Dans les sols acides, on recommande la pulvérisation foliaire utilisant des formes de zinc à faible assimilation car ZnSO_4 est rapidement lessivé. Le tableau 4 propose les principales sources de zinc.

Le manganèse (Mn)

Rôles physiologiques

Le manganèse est reconnu comme un important activateur des enzymes d'oxydoréduction, de décarboxylation et de transfert des radicaux.

La déficience en manganèse affecte la formation des chloroplastes, l'intensité de la photosynthèse et l'activité de la nitrate réductase. Il en découle une accumulation considérable des nitrates. Par ailleurs, il a été signalé que le manganèse est impliqué dans la régulation de l'absorption de l'eau par la plante. On pense également que le manganèse confère aux plantes la résistance contre certaines maladies; c'est le cas du virus BMV, virus affectant la betterave.

Déficience

Dans un sol riche en matière organique, à pH neutre ou alcalin, les risques d'apparition d'une carence en manganèse sont importants. Le pH agit sur l'assimilation du manganèse en favorisant l'oxydation de Mn^{2+} soluble ainsi que sa complexation avec la matière organique. Chaque augmentation de pH d'une unité induit une diminution de 100 fois la solubilité de Mn^{2+} . Certaines formes de matière organique peuvent fixer le manganèse sous forme non assimilable, c'est le cas de l'acide humique.

Chez les monocotylédones, les symptômes de

Tableau 3. Les principales sources d'engrais de cuivre

Sources d'engrais	Formule	Teneur cuivre (%)
Sulfate de cuivre soluble	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25
Sulfate de cuivre soluble	$\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	35
Bouillie bordelaise	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2 + \text{CuSO}_4$	12.5
Oxyde cuivreux	Cu_2O	89
Oxyde cuivrique	CuO	75
Hydroxyde de cuivre	Cu(OH)_2	50
Oxychlorure de cuivre	$\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2$	52
Chlorure de cuivrique	CuCl_2	17
Cories	$\text{Na}_2\text{Cu HEDTA}$	2-5
Cuivre fritté	NaCu EDTA	-

Tableau 4. Les principales sources d'engrais de zinc

Sources d'engrais	Formule	Teneur zinc (%)
Sulfate de zinc monohydraté soluble	$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	35
Sulfate de zinc heptahydraté soluble	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	23
Oxyde de zinc soluble	ZnO	78
Carbonate de zinc insoluble	ZnCO_3	52
Sulfure de zinc	ZnS	67
Chélate de zinc	$\text{Na}_2\text{Zn EDTA}$	14
Chélate de zinc	NaZn NTA	13
Chélate de zinc	NaZn HEDTA	9
Polyflavonoïdes de zinc	-----	10
Lignosulfonates de zinc	-----	5



Symptômes de carence en zinc (agrumes)



Symptômes de carence en manganèse (agrumes)

déficience se caractérisent souvent par la présence de taches gris-vertâtres, les nervures principales bordées de vert, les feuilles parfois repliées à la base. Au stade avancé, la chlorose se généralise à toute la feuille.

Chez les dicotylédones, les symptômes se manifestent par des ponctuations jaunes sur les feuilles. A l'opposé du fer, les nervures restent vertes. Plus tard, apparaissent des nécroses qui perforent parfois la feuille.

Sur les arbres fruitiers et particulièrement chez la vigne, les symptômes de déficience présentent une caractéristique typique; ils débute sur les feuilles âgées sous forme d'une chlorose marginale internervaire de type diffus. Les espèces les plus sensibles sont le pêcher et le cerisier.

Sur agrumes, les symptômes apparaissent d'abord sur les jeunes feuilles et peuvent par la suite se manifester sur les feuilles plus âgées si la carence persiste. Le symptôme le plus typique est la présence de marbrure vert-clair le long des bords des feuilles.

Correction

La pulvérisation foliaire est le seul moyen efficace et économique pour une lutte curative. L'enfouissement au sol est moins efficace, car le manganèse est souvent oxydé et rendu insoluble. Pour guérir une culture de céréales carencées en manganèse, il est recommandé de pulvériser 3 à 5 Kg de sulfate de manganèse en apport foliaire ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) par hectare. Le tableau 5 propose les principales sources d'engrais de manganèse.

Le sulfate de manganèse (MnSO₄) est considéré le plus efficace. On classe les engrais à base de manganèse selon leur efficacité décroissante comme suit:

MnSO₄ > MnO > MnCO₃ > MnO₂ > Mn EDTA

La meilleure procédure de correction de la carence en manganèse par l'apport au sol, consiste en un apport du manganèse incorporé avec un engrais acidifiant qui retarde l'oxydation du manganèse.

Le bore (B)

Rôles physiologiques

Le bore est prélevé par la plante sous forme d'acide borique H₃BO₃ dans des sols ayant un pH inférieur à 9. Le bore joue un rôle dans:

- La migration et l'utilisation des glucides et des assimilats;
- La formation des ribosomes, la synthèse des protéines et la croissance méristématique;
- L'absorption du potassium, du phosphore, du magnésium et autres cations;
- La stérilité ou la malformation des tissus reproductifs, en cas de carence en bore.

Déficiência

La teneur moyenne des sols en bore varie de 1 à 2 ppm. Au dessous de 0,6 ppm, il y a risque de carence. L'assimilation du bore diminue quand le pH augmente. Il y a une corrélation négative entre le pH du sol et l'assimilation du bore, surtout pour des pH > 6,5.

Les symptômes morphologiques externes d'une déficiencia en bore sont comme suit:

- Epaissement des bourgeons terminaux dans le cas d'une déficiencia grave; les jeunes feuilles sont déformées, ridées, épaisses de couleur vert-bleuâtre. Parfois une chlorose irrégulière se produit entre les nervures. Par la suite, les bourgeons terminaux et le point de croissance se dessèchent en brunissant ou en noircissant; les feuilles et les tiges deviennent rigides, cassantes et fragiles.
- Sur le système racinaire, la carence en bore se caractérise par des racines épaisses, visqueuses et nécrosées. Chez la betterave sucrière, la déficiencia en bore est très souvent élucidée par la pourriture du cœur des betteraves. Les jeunes feuilles sont frisées et rabougries, se dessèchent et noircissent. Des taches brunes apparaissent sur la partie supérieure du pétiole avec des craquelures transversales. La majorité des feuilles dépérissent; les points de croissance meurent et se nécrosent; la couronne de la betterave commence à pourrir; le centre de la betterave se creuse et noircit.
- La formation des plages liégeuses internes et externes est un symptôme qui caractérise la carence en bore chez plusieurs plantes, entre autres, la tomate, le chou-fleur, les citrus et le pommier.

Les dicotylédones sont plus sensibles à la présence de bore que les monocotylédones. Chez les arbres fruitiers, la sensibilité à la carence en bore diffère selon l'espèce et la variété. On classe les espèces fruitières selon leur réponse à la déficiencia en bore comme suit:

Pommier > Poirier > Pêcher > Cerisier

Le symptôme le plus typique de la carence en bore rencontré sur les fruits de pommier et de poirier se manifeste sous forme de taches liégeuses à l'intérieur du fruit et sur la robe. Le tableau 6 classe les plantes selon leur sensibilité à la déficiencia en bore.

Correction

La carence en bore peut être corrigée soit par l'apport au sol ou par pulvérisation foliaire. Les apports au sol des fertilisants boratés en mélan-

ge avec les autres engrais sont souvent pratiqués pour corriger la déficiencia en bore sur les cultures annuelles tandis que la pulvérisation foliaire est surtout appliquée sur les cultures en pleine croissance ou sur les cultures pérennes. Les principales sources de bore sont résumées dans le tableau 7.

Les légumineuses et certaines plantes racines ont besoin de 2 à 4 kg/ha de bore. Concernant la betterave à sucre, la dose recommandée est de 2 à 3 kg/ha, assurant une amélioration du rendement et de la qualité technologique des racines. Pour les autres cultures, les doses optimales sont illustrées dans le tableau 8.

Le molybdène (Mo)

Rôles physiologiques

Le molybdène est un constituant de l'enzyme impliquée dans la fixation de l'azote gazeux par le *Rhizobium* des légumineuses et de celle impliquée dans la réduction des nitrates. Par ailleurs, l'excès de molybdène dans la ration alimentaire des animaux peut provoquer des troubles digestifs graves pour le bétail.

Déficiência

La déficiencia en molybdène est conditionnée par plusieurs facteurs notamment le pH du sol, la matière organique, et les interactions avec les autres éléments minéraux. C'est le seul oligo-élément dont la carence est favorisée par l'acidité du sol et disparaît généralement suite à un chaulage. Ainsi, l'absorption de molybdène par les plantes est favorisée par un pH élevé.

L'avoine est la plus sensible des céréales à la déficiencia en molybdène. Les symptômes de cette déficiencia sont visibles sur les glumes qui ne se développent pas normalement et prennent une teinte bleue-verte, la maladie est appelée "bleue chaf": Glume bleue ou paille bleue.

Pour les arbres fruitiers, excepté les agrumes, la déficiencia en molybdène est pratiquement inconnue. La déficiencia en molybdène sur agrumes a été étudiée. Les symptômes apparaissent sur les feuilles des rameaux terminaux généralement non fructifères, elles jaunissent à l'extrémité apicale, s'enroulent autour de la nervure centrale donnant un aspect typique à l'arbre, ensuite elles se nécrosent progressivement et tombent à l'automne.

Correction

La pulvérisation foliaire constitue un moyen efficace pour une lutte curative. Un apport de 0,01 à 0,05 kg/ha de molybdène pourra souvent corriger la carence en molybdène. Le molybdate d'ammonium et le molybdate de sodium sont très solubles et sont les formes les plus utilisées pour corriger la déficiencia en molybdène.

Le chlore (Cl)

La plante absorbe le chlore sous sa forme ionique Cl⁻ qui est présente dans l'eau naturelle, il est important pour les réactions photosynthétiques dans la plante et il est utilisé dans la régulation du potentiel de turgescence des cellules.

Bien que la déficiencia en chlore soit rare en pratique, les engrais contenant le chlore sont devenus essentiels pour la résistance aux maladies. Ainsi, l'apport de chlorure de potassium couvre largement les besoins en chlore de la culture.

Le nickel (Ni)

Le nickel est absorbé par la plante sous la forme cationique bivalente (Ni²⁺). C'est seulement à partir de 1989 que le nickel a été reconnu comme élément essentiel pour la plante. C'est un composant de l'enzyme uréase qui transforme l'urée en ammonium dans les tissus des

Tableau 5. Principales sources d'engrais manganèse

Sources d'engrais	Formule	Teneur Mn (%)
Sulfate de manganèse	MnSO ₄ , 4H ₂ O	26 à 28
Oxyde de manganèse	MnO	41 à 68
Carbonate de manganèse	MnCO ₃	31
Chlorure de manganèse	MnCl ₂	17
Oxyde de manganèse	Mn ₂ O ₃	63
Chélate de manganèse	Mn EDTA	12
Manganèse frittée	-	10 à 25
Polyflavonoïdes de Mn	-	50 g/kg
Polyflavonoïdes de Mn	-	50-70 g/kg

Tableau 6. Sensibilité relative des cultures à la déficiencia en bore (Loué, 1993)

Sensibles
Arachide, Asperge, Betterave sucrière, Betterave fourragère, Caféier, Carotte, Choux-fleur, Colza, Coton, Luzerne, Navet, Olivier, Palmier, Tournesol, Vigne
Moyennement sensibles
Banancier, Chou, Cocotier, Laitue, Lin, Maïs, Oignon, Poirier, Pêcher, Radis, Tabac, Théier, Tomate, Tréfle
Peu sensibles
Agrumes, Ananas, Avoine, Blé, Canne à sucre, Concombre, Fraisier, Graminées fourragères, Haricots, Orge, Pois, Pomme de terre, Riz, Seigle, Soja, Sorgho

Tableau 7. Les principales sources d'engrais de bore

Sources d'engrais	Formule	Teneur bore (%)
Borax	Na ₂ B ₄ O ₇ , 10H ₂ O	11,5
Tetraborate de sodium	Na ₂ B ₄ O ₇ , 5H ₂ O	14
Tetraborate de sodium	Na ₂ B ₄ O ₇	20
Pentaborate de sodium	Na ₂ B ₅ O ₁₀ , 10H ₂ O	18
Solubor (hydrate)	Na ₂ B ₄ O ₇ , 5H ₂ O	20,5
Acide borique	Na ₂ B ₄ O ₇ , 10H ₂ O	17,5
Bore fritté	H ₃ BO ₃	10 - 17
Colémanite	Na ₂ B ₄ O ₇ , xH ₂ O	11 - 13

Tableau 8. Sources et doses d'engrais de bore préconisées sur certaines cultures (Martens et Westerman, 1991)

Culture	Engrais	Dose (kg/ha)
Luzerne	Na ₂ B ₄ O ₇	2,24
Vigne	Solubor	0,78
Pin	Na ₂ B ₄ O ₇ , 10H ₂ O	5,70
Colza	H ₃ BO ₃	1,40
Soja	Na ₂ B ₄ O ₇ , 5H ₂ O	1,12
Fraisier	Na ₂ B ₄ O ₇	1,12
Canne à sucre	Solubor	2,20



Symptômes de carence en bore (agrumes)



Symptômes de carence en molybdène (cucurbitacées)

plantes. Par conséquent, le nickel est très important dans tous les métabolismes azotés.

Les quantités exigées en nickel sont très faibles. Dans le sol, le niveau critique apparaît autour de 0,1 ppm. La carence en nickel se manifeste par une chlorose des jeunes feuilles, et par la mort des méristèmes. En pratique, les carences en nickel ne se rencontrent pas. L'intérêt académique de la déficiencia en nickel est plus important que son intérêt commercial ■.

Prof. Ali Chafai ELALAOU
Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès