

FICHE TECHNIQUE

L'importance des éléments mineurs : des carences à la toxicité. Une préoccupation en agriculture biologique ?

B. Estevez, agr.

Introduction

- Les éléments mineurs sont importants pour les végétaux
- Les sols carencés peuvent nuire au développement végétal et réduire ainsi la qualité du produit
- Certains éléments mineurs sont des métaux lourds et lorsque les sols sont saturés, la disponibilité pour la plante peut potentiellement créer de la phytotoxicité augmentant le risque de la contamination de l'environnement et de la chaîne alimentaire des humains et des animaux

Les éléments mineurs (ou oligo-éléments) du sol importants au Québec

- Zinc (Zn)
- Cuivre (Cu)
- Manganèse (Mn)
- Fer (Fe)
- Molybdène (Mo)
- Bore (B)

Tableau 1. Le rôle des éléments mineurs pour les plantes : fonctions physiologiques (Parent et Rivest, 2003 ; Comeau et al., 2006)

Éléments mineurs/Symbole chimique	Fonctions
Fer (Fe)	Rôle majeur dans la synthèse de la chlorophylle et les protéines
Manganèse (Mn)	Participe à la production d'oxygène moléculaire lors de la photosynthèse; essentiel à l'élongation des racines et à la synthèse des membranes et des substances de défense.
Cuivre (Cu)	Impliqué dans la biosynthèse de la lignine, des alcaloïdes et des phytoalexines (antibiotiques contre les maladies)
Zinc (Zn)	Impliqué dans la photosynthèse
Molybdène (Mo)	Nécessaire à la réduction du nitrate et à la fixation symbiotique du N ₂
Bore (B)	Le bore aide le transport des sucres et stabilise les membranes. Les dicotylédones (feuilles larges) sont plus sensibles aux carences. Dans une plante bien pourvue de B, les organes reproducteurs sont plus viables et les racines poussent mieux.

La disponibilité des éléments mineurs : la nature du sol et les pratiques agricoles

Les types de sol : une dimension intrinsèque

Pour les éléments mineurs, leur disponibilité potentielle dépend des types de sols et particulièrement leurs caractéristiques physico-chimiques. Selon Tran et al. (1995), les facteurs les plus importants sont :

- La texture
- Le pH (un des facteurs physico-chimiques du sol les plus importants. En effet, l'acidité du sol les rend plus disponibles mis à part le molybdène pour lequel c'est le contraire).
- La teneur en matière organique
- L'humidité du sol
- Le potentiel d'oxydo-réduction (aération et humidité du sol)

Le tableau 2 mentionne le potentiel de carence en fonction du type de sol et des régions du Québec. Précisons que dans ce tableau, on réfère aux teneurs en éléments mineurs disponibles et non aux teneurs totales. Pour une bonne compréhension de la problématique, il faut cependant être averti de quelques précisions pour bien interpréter les résultats d'analyse des teneurs du sol en éléments mineurs.

- Les analyses de sol donnent la teneur des éléments nutritifs facilement assimilables, donc potentiellement disponibles à la plante via la solution du sol.

▪ Certaines séries de sol sont moins bien pourvues en éléments mineurs que d'autres surtout selon leur texture et leur groupe pédologique (Giroux et al., 1992).

▪ Lorsque l'on parle de teneur totale en éléments mineurs du sol, on fait référence à la quantité totale présente dans toutes les fractions d'un échantillon de sol. Il faut savoir que l'on a alors utilisé une méthode d'analyse très forte, différente de la méthode Mehlich-3 utilisée de manière routinière pour les analyses de sol au Québec et qui nous informe de la disponibilité potentielle pour la plante.

▪ Ainsi, la méthode Mehlich-3 est bien adaptée aux sols du Québec souvent acides. Cependant, étant donné que cette méthode extrait à des pH très bas et non au pH du sol, les résultats doivent donc être interprétés comme le potentiel de disponibilité des éléments mineurs du sol.

Par conséquent, il est possible qu'un sol à teneur moyenne puisse induire une carence, mais aussi, qu'un sol très riche ne puisse pas induire automatiquement une toxicité. C'est dire que la notion de disponibilité réelle doit être prise en compte et ce en fonction à la fois des caractéristiques physico-chimiques du sol (pH, CEC, le potentiel redox..) et des pratiques agricoles.

Tableau 2. Carences potentielles en éléments mineurs selon le type de sol et les régions du Québec (Tran et al., 1995)

Éléments mineurs	Caractéristiques physico-chimiques des sols et particularités
Fer	Généralement assez élevé dans les sols. Les carences sont plutôt observées dans les sols organiques. Carence très répandue en sol calcaire mais rare au Québec. Son effet peut augmenter l'absorption du manganèse (Mn) jusqu'à des seuils toxiques
Manganèse	Correction de l'acidité par le chaulage diminue le risque de toxicité mais accroît le risque de carence. La carence peut apparaître surtout en sol léger bien aéré ou en sol alcalin riche en humus. Correction possible par des applications de MnSO sur les feuilles. Le sol immobilise le manganèse rapidement si la microflore est du genre à oxyder le manganèse. La toxicité est possible en conditions anaérobies ou trop acides. L'excès de manganèse produit une perte de dominance apicale et la formation de « balais de sorcière ». En cas de surchaulage, le problème de la carence du manganèse s'accroît davantage surtout en sols sableux et riches en matière organique. La teneur disponible diminue avec l'aération du sol (drainage). Faibles teneurs fréquentes en sols légers : Bois-Francs, Outaouais, Laurentides, Mauricie, Saguenay et Lac St-Jean
Cuivre	Carence surtout avec un pH élevé, en sols sableux, pauvres en Cu et riches en matière organique La carence retarde la floraison, nuit à la fertilité du pollen, nuit à la formation des parois cellulaires surtout après la mi-saison. L'application d'azote accentue la carence en cuivre. L'utilisation de sulfate de cuivre devient alors nécessaire. L'utilisation intensive de déchets d'origine industrielle ou urbaine, de lisiers et de fumiers riches en cuivre peut faire augmenter la teneur du sol mais simultanément immobiliser le cuivre qui devient non disponible aux plantes, ce qui mène à la carence en cet élément (problème de métaux lourds). Le Cu est fortement lié à la matière organique du sol et n'est pas facilement lessivé. Les fortes doses d'azote et de phosphore et un excès de zinc peuvent entraver l'absorption du cuivre par la plante. Faibles teneurs possibles dans les régions : Saguenay et Lac St-Jean. Un manque de cuivre peut favoriser l'ergot de l'orge et ratatiner les grains de céréales (Alberta's agriculture ministry, 1999).
Zinc	Carence surtout dans les sols dont le pH est >6,8 et riches en phosphore assimilable. De fortes applications d'engrais phosphatés sur des sols contenant peu de zinc disponible peuvent induire la carence de zinc et augmenter le besoin des plantes en cet élément. L'utilisation intensive de déchets d'origine industrielle ou urbaine, de lisiers et de fumiers riches en zinc peut faire augmenter la teneur du sol en cet élément et causer des problèmes de métaux lourds. Faibles teneurs possibles dans les régions : Saguenay et Lac St-Jean
Molybdène	Contrairement aux autres éléments mineurs, la disponibilité du Mo augmente avec l'augmentation du pH du sol. La carence se manifeste surtout chez les légumineuses et les crucifères et chez l'oignon cultivé en sol organique nouvellement mis en culture. L'absorption du Mo augmente avec l'humidité du sol et certains sols mal drainés peuvent provoquer l'excès de Mo dans les fourrages
Bore	La disponibilité dépend du taux de matière organique et du pH. A pH < 7, le bore est sous forme d'acide borique dans la solution du sol, la forme d'absorption dominante (Parent et Rivest, 2003). Carence très répandue sous les climats très pluvieux favorisant le lessivage de l'acide borique dans les sols alcalins et argileux. Étude préliminaire effectuée par les laboratoires régionaux en 1993 : Disponibilités faibles (0,3 mg kg ⁻¹) dans les régions de Québec, Bois-Francs, Saguenay, Lac St-Jean et ailleurs

Précisons que la disponibilité des éléments mineurs est aussi relative à la culture puisque certaines d'entre elles sont plus sensibles aux carences (Tran et al., 1995). C'est le cas notamment de la luzerne et des légumes qui ont de plus grands besoins de bore (Parent et Rivest, 2003), un élément qui est aussi impliqué dans la stérilité du blé (Subedi et al., 1997). En effet le bore joue un rôle dans le développement du pollen, la germination et le développement du tube du pollen et par conséquent, le développement reproductif. Ainsi, la viabilité du pollen peut être inhibée lors d'une carence en bore. Les céréales sont spécialement sensibles aux carences en bore et en manganèse. Le maïs a grand besoin de zinc.

Les pratiques agricoles : une dimension anthropique

Les pratiques suivantes sont celles qui influencent le plus la disponibilité des éléments mineurs.

▪ Drainage

Par exemple, le manganèse devient très soluble lorsque le pH est inférieur à 5,5 et que les conditions de sol sont réductrices. Cet élément peut donc devenir toxique lorsque sa concentration dans la solution du sol dépasse 4 ppm. Ainsi, cette toxicité a plus de chance de se produire dans les sols acides mal drainés (FAO, 1998). À l'inverse, la solubilité du manganèse est plus faible dans les sols de drainage excessif comme les sols sableux grossiers.

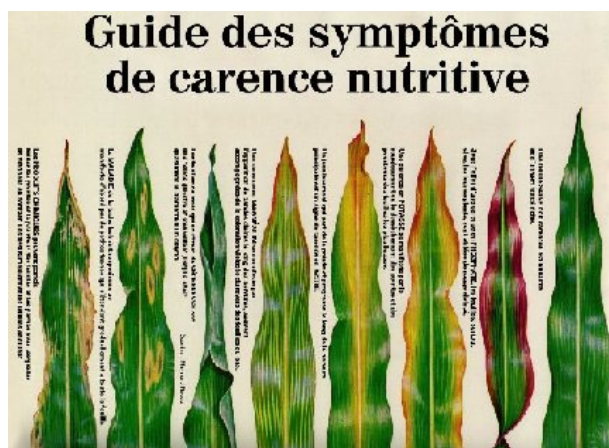
▪ Chaulage

En augmentant le pH par le chaulage par exemple, on augmente la disponibilité du molybdène (Mo) mais on diminue par contre la disponibilité de plusieurs autres éléments mineurs : zinc, cuivre, manganèse, bore et le fer surtout à des pH > 6,8. Ainsi, le pH peut être un indicateur de risque potentiel.

▪ Fertilisation

La fertilisation peut remédier à des carences d'éléments mineurs dans la saison, soit de manière minérale, dont la pulvérisation foliaire ou par des engrais de ferme.

Symptômes des carences



Guide des symptômes de carence nutritive (maïs) (MAAARO, 2002).

La visualisation des symptômes n'est pas toujours suffisante pour gérer une carence. Des analyses de tissus ainsi que des analyses de sol sont ensuite nécessaires pour mieux évaluer l'importance du phénomène et ainsi, agir en conséquence. L'interprétation des résultats d'analyses d'éléments mineurs exige de prendre en compte un grand nombre de facteurs, soit les caractéristiques physico-chimiques du sol et les pratiques agricoles.

Complexité de l'interprétation des carences (Photo Semican/Comeau, explication, A. Comeau, AAC)

« Ne jamais juger la carence à l'œil ! Dans la photo ci-dessous, le feuillage de Barrie adopte une coloration jaune et semble souffrir de carence en soufre. Ce diagnostic visuel est erroné. L'analyse de sol révèle: P, K, Mg, Mn, B tous au niveau faible et Zn, Cu au niveau très faible. L'usage d'engrais N-P-K n'a pas empêché le Barrie de faire ici une performance désastreuse. Par contre, la lignée expérimentale à droite tolère très bien ces conditions difficiles. Il y a donc une composante génétique possible. On peut tenter d'évaluer les carences à l'œil mais ce n'est pas une approche logique car des carences multiples sont difficiles à interpréter. De tels cas ne sont pas rares au Québec. Donc l'analyse totale des sols est indispensable. Ajouter de l'azote et du phosphore sur un sol carencé en éléments mineurs est une dépense inutile et même un acte de pollution car ces produits ne seront pas utilisés par la plante ».

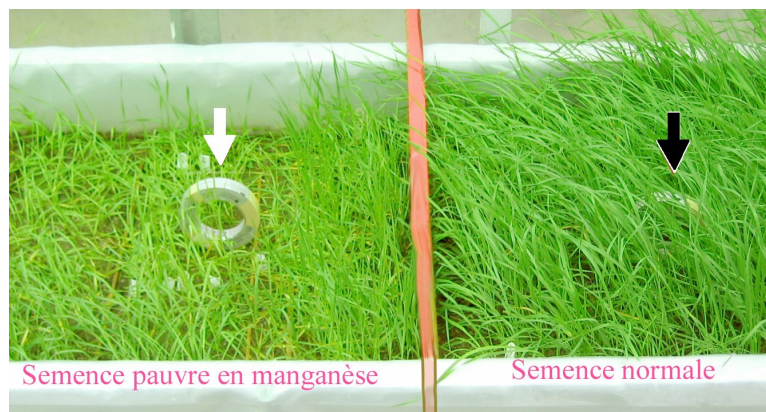


Les carences des semences

Comeau et al. (2006) ont illustré l'importance des éléments mineurs dans les semences pour permettre un bon établissement des céréales. Celui-ci fait la différence dans la compétition contre les mauvaises herbes qui pose un grand défi en agriculture biologique. Les auteurs mettent l'accent sur le manganèse et le bore pour lesquels des carences seraient encore fréquentes au Québec. De plus, les symptômes ne sont pas souvent faciles à détecter et de ce fait, les rendements des cultures peuvent être lourdement atteints.

Le cas du manganèse (Photo et explication, A. Comeau, AAC)

« L'image ci-dessous illustre un essai de semis dans un sol à faible teneur de manganèse (moins de 5 ppm). On voit à gauche des plantules de blé issues de semence appauvrie en Mn parce que cette semence avait été produite sur un sol pauvre en manganèse. À droite, le résultat est bien différent avec la semence provenant de sol riche en manganèse. En effet, la réserve présente dans la semence offre au moins un départ adéquat, capable de masquer un rouleau de ruban-cache. Noter que dans ce cas, la carence se manifestera avec retard, vers la floraison. À tout prendre, mieux vaut une semence riche en Mn cultivée sur un sol riche en Mn, mais l'apport de Mn venant de la semence est tout de même biologiquement très significatif, et peut augmenter le rendement l'année subséquente ». Ce chercheur précise qu'au Québec, ce genre de carence peut apparaître avec d'autres éléments mineurs, notamment le bore. Lorsque l'on utilise sa propre semence, il faut donc connaître si les sols ont des carences ».



Des éléments mineurs aux métaux lourds

Dans le registre de la pollution agricole (sol et eau), les métaux lourds sont une préoccupation de plus en plus inquiétante car certains de ces éléments peuvent se retrouver dans la chaîne alimentaire. Ce que l'on appelle communément les métaux lourds est aussi nommé les ÉTM pour « Éléments traces métalliques ».

Les matières résiduelles fertilisantes (MRF) peuvent être une source potentielle d'ÉTM (Deschênes et al., 2006) (boues d'épuration de stations d'épuration des eaux, les poussières de cimenteries, les composts urbains, les cendres de bois, les bois raméaux, les résidus de pâtes et papiers..). Leur valorisation agricole est encadrée par une législation du ministère de l'environnement (MDDEP, 2004).

Les fumiers et les lisiers ne sont pas non plus sans potentiel de contamination. En effet, l'utilisation d'engrais de ferme peut contribuer à enrichir les sols et occasionner des pertes d'ÉTM dans les eaux de ruissellement, notamment pour Cu, Zn et Mn et ce davantage dans le maïs que dans les prairies (Deschênes et al., 2006). Toujours au Québec, Giroux et al. (2005) ont mis en évidence que l'apport de lisiers pendant 25 ans a affecté les teneurs totales et disponibles du sol en zinc et en cuivre, de même que celles des fractions échangeable, organique et des oxydes libres. L'apport de Cu et de Zn par le lisier de porc pendant 25 ans a augmenté la saturation des sites de fixation, ce qui accroît la mobilité des ÉTM. À plus long terme, les matières organiques fertilisantes contenant des ÉTM devront être réduites pour ce sol afin de ne pas atteindre des niveaux phytotoxiques pour les plantes ou toxiques pour la chaîne alimentaire.

Dans le tableau 3, nous présentons les principaux métaux lourds selon leur degré de risque pour les humains. Vous constaterez que parmi les sept métaux lourds les plus à risque, trois d'entre eux sont aussi des éléments mineurs. Il est important de savoir que souvent, la marge entre la carence et la toxicité est parfois mince. Giroux et al. (1992) mentionnent le cas du cuivre (Cu) (tableau 4).

Tableau 3. Les métaux lourds selon leur risque pour l'environnement et la chaîne alimentaire (Giroux et al., 1992)

Risque faible	Risque important
Mn (manganèse)	Zn (zinc)
Fe (fer)	Cu (cuivre)
Al (aluminium)	Mo (molybdène)
Cr (chrome)	Ni (nickel)
Sb (antimoine)	Cd (cadmium)
Pb (plomb)	Co (cobalt)
As (arsenic)	Se (sélénium)
Hg (mercure)	

Tableau 4. Carence et toxicité du cuivre dans les végétaux (Harter, 1983 cité par Giroux et al., 1992).

Carence	Niveau de suffisance	Risque important
1 à 5 ppm	5 à 15 ppm	Entre 16 et 20 ppm

Ainsi, la toxicité des éléments mineurs est possible et provient toujours d'une grande disponibilité dans le sol. Celle-ci n'a pas toujours un lien direct avec la teneur totale du sol en éléments mineurs. Puisque la disponibilité est en cause, le pH est souvent le facteur principal.

Les teneurs les plus élevées des métaux lourds sont trouvées dans des sols argileux. Ainsi, leur teneur totale est en relation avec les groupes texturaux : argiles>loams argileux>loams>sables (Giroux et al., 1992).

Comme avec le cas des éléments mineurs, la teneur totale des métaux lourds du sol n'indique pas la disponibilité à la culture, donc le potentiel de toxicité, non plus le risque de contamination de la chaîne alimentaire que ce soit pour les humains ou le bétail.

Les matières fertilisantes sur lesquelles l'agriculteur a un contrôle sont d'autant plus préoccupantes que les ÉTM s'y trouvent surtout dans des fractions labiles donc potentiellement disponibles (Deschênes et al., 2006; Giroux et al., 2005). Il est donc très important pour l'évaluation du risque de connaître les liens entre la teneur du sol et la concentration dans les tissus végétaux

Pour déterminer le niveau de contamination des sols, il est alors nécessaire de compléter le suivi avec d'autres analyses. Deschênes et al. (2006) ont mis au point une méthode d'évaluation du potentiel de risque des ÉTM en trois étapes :

- 1) L'analyse Mehlich-3 du sol qui permet de déterminer la disponibilité potentielle des ÉTM en rapport aux teneurs naturelles est la première étape de cette approche. Si la teneur dépasse un certain seuil, on passe à la seconde étape
- 2) En deuxième étape, une analyse de trois fractions des ÉTM du sol (échangeable, organique et des oxydes libres) est effectuée. Ce fractionnement permet de mieux connaître la mobilité des ÉTM et le niveau de contamination chimique du sol. Advenant le cas d'une solubilité excessive (la fraction échangeable est alors élevée) et d'un enrichissement important de la fraction organique et celle des oxydes libres, le sol n'est vraisemblablement plus en mesure de contrôler adéquatement la mobilité des ÉTM. Un doute apparaît alors si son niveau de contamination élevé peut représenter un risque pour la chaîne alimentaire. Il faut alors s'en assurer par une dernière étape.
- 3) Des tests écotoxicologiques (organismes vivants) et enzymatiques (fonctions enzymatiques du sol) permettront d'évaluer le niveau de toxicité pour les organismes du sol, les plantes, les animaux et pour le milieu aquatique et par conséquent pour la chaîne alimentaire. C'est donc suite à cette dernière analyse qu'il sera possible de parler de toxicité des ÉTM dans les sols.

À l'étape 1 et 2, on parlera d'accumulation, d'enrichissement en ÉTM, de niveau de contamination et de pollution diffuse. Cette démarche en trois étapes est importante et permet de parler de la problématique des ÉTM dans une approche préventive.

▪ Certaines situations sont plus à risque (Baize, 2000) :

La viticulture et l'arboriculture notamment par l'utilisation de la bouillie bordelaise, fongicide à base de sulfate de cuivre. Celui-ci étant un puissant antibiotique, un impact négatif sur la vie microbienne du sol est possible.

Les parcelles qui ont reçu des produits phytosanitaires pendant une longue période (Zn, Hg, Pb, As, Cu) ou par une fertilisation minérale élevée et soutenue (Cd).

Les parcelles ayant reçu des boues industrielles fortement chargées en métaux lourds et pendant une longue période (Cd, Pb, Cu, Zn, Hg) ou encore des composts d'ordures ménagères (Mench et Baize, 2004).

L'épandage à hautes doses de lisier pendant une longue période peut enrichir le sol en Cu et en Zn.

La proximité d'usines métallurgiques, d'exploitations minières ou d'incinérateurs est une source de contamination par voie atmosphérique.

Conclusion

L'analyse des éléments mineurs du sol est la première démarche pour évaluer un potentiel de carence. Un suivi au cinq ans est souvent approprié. L'échantillonnage doit être bien représentatif, l'utilisation d'un GPS est un atout pour prendre en compte l'hétérogénéité du sol.

Bibliographie

Alberta's agriculture and industry. 1999. Copper deficiency : diagnosis and correction. Agdex 532.3. 7pp.

Baize, D. 2000. Teneurs totales en "métaux lourds" dans les sols français. Le courrier de l'environnement de l'INRA. No 39 : 39-54.

Comeau, A., Pageau, D., Voldeng, H. Brunelle, A. 2006. Les oligoéléments : Essentiels à l'établissement du couvert végétal dans les céréales. Grandes cultures, Vol. 16 (4) :34-36.

Deschênes, L., R. Chassé, M. Giroux, C. Bastien, L. Jean, V. Bécaert, D. Martineau et G. Côté, G. 2006. Développement d'une méthode d'évaluation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments traces métalliques d'un sol. PARDE, 147p + annexes

FAO. 1998. Evaluation des Terres pour l'Agriculture Pluviale - Bulletin Pédologique de la FAO - 52

Giroux, M., R. Chassé, L. Deschênes et D. Côté. 2005. Étude sur les teneurs, la distribution et la mobilité du cuivre et du zinc dans un sol fertilisé à long terme avec des lisiers de porcs. Agrosol. Vol. 16 (1) : 23-32.

Giroux, M. M. Rompré, D. Carrier, P. Audesse et M. Lemieux. 1992. Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec. Agrosol, Vol. 5 (2) :46-55.

MAAARO. 2002. Autres problèmes liés à la culture du maïs. Publication 811F.

MDDEP. 2004. Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes : critères de référence et normes réglementaires.
http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/critere/index.htm

Mench, M. et D. Baize. 2004. Contamination des sols et de nos aliments d'origine végétale par les éléments en traces. Mesures pour réduire l'exposition. Courrier de l'environnement de l'INRA. No 52 :31-56.

Parent, L.O. et R. Rivest. 2003. Les éléments nutritifs Dans le Guide de fertilisation. 1ère édition. CRAAQ, Québec. 294pp.

Subedi, K.D., C.B. Budhathoki, M. Subedi and D.G.C. Yubak.1997. Variation in sterility among wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes in response to boron deficiency in Nepal. *Euphytica*. 95. 21-26.

Tran, T.S., M. Giroux, P. Audesse et J. Guilbault. 1995. Importance des oligo-éléments en agriculture : symptômes visuels de carence, analyses des végétaux et des sols. *Agrosol*, Vo. 8 (1) :12-22.

Remerciements :

Cet article a été rédigé dans le cadre du projet « Semences : Développement et réseautage » du SPGBQ, financé par le Programme de soutien au développement de l'agriculture biologique (PSDAB) du MAPAQ. Nous remercions les chercheurs Marcel Giroux (IRDA) et André Comeau (AAC, Ste Foy) pour leur contribution très appréciée

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 

G:\Agriculture biologique\SYNDICATS AFFILIÉS\Grains Bio\Projets\Reproduction semences bio\Diffusion\Fiche technique éléments mineurs.doc