



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

par Bernard Estevez, agr.

**« Tout est toxique, rien n'est toxique, c'est la dose qui fait la différence. »
Paracelse (Chimiste et médecin suisse : 15-16^{ème} siècle)**

Le 12 décembre 2006

La réalisation de cette étude a été rendue possible grâce à l'appui financier du Programme de soutien au développement de l'agriculture biologique du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec



Introduction

Dans le cadre d'un projet du Syndicat des producteurs de grains biologiques du Québec (SPGBQ) qui porte sur les besoins en semences produites en régie biologique, le chercheur André Comeau, phytogénéticien (AAC, Station de Ste-Foy) spécialisé dans les céréales nous a sensibilisé à la problématique des carences en éléments mineurs sur la qualité des grains et des semences notamment.

Cet article propose un tour d'horizon de cette problématique complexe tant les ramifications de ses conséquences sont nombreuses. Voici les principaux constats effectués à propos des éléments mineurs :

- 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 ;
- Cette problématique est commune à l'agriculture quelle que soit sa régie ;
- Dans une perspective à long terme, les producteurs biologiques devraient être tout aussi concernés que les agriculteurs conventionnels soit par l'importation de matières organiques qui peuvent contenir des métaux lourds ou par l'utilisation du sulfate de cuivre comme fongicide, ou par tout autre produit qui contient des métaux lourds.

1. Les éléments mineurs : des carences à la toxicité

En matière de fertilisation, on distingue trois types d'éléments nutritifs (tableau 1)

Tableau 1. Les types d'éléments nutritifs pour les végétaux

Éléments Majeurs	Éléments secondaires	Éléments mineurs	Indésirables
N (Azote) P (Phosphore) K (Potassium)	Ca (Calcium) Mg (Magnésium) S (Soufre)	Zn (Zinc) Cu (Cuivre) Mn (Manganèse) Fe (Fer) B (Bore) Mo (Molybdène)	As (Arsenic) Cd (Cadmium) Hg (Mercure)

1.1. L'importance des éléments pour la croissance des végétaux

Bien que les éléments mineurs ou oligo-éléments (terme surtout employé en France) soient utilisés en faible quantité par les plantes, ils ne sont pas moins indispensables que les macro-éléments. En effet, ils sont nécessaires à un métabolisme normal pour assurer une bonne croissance (Tran et al., 1995). Plus précisément, les éléments mineurs contribuent à différentes fonctions physiologiques des plantes à des concentrations faibles (Parent et Rivest, 2003). Le tableau 2 énumère ces éléments ainsi qu'un aperçu de leurs fonctions dans le métabolisme de la plante. Pour certains de ces éléments, l'aspect toxique y est mentionné.

Tableau 2. Éléments mineurs et fonctions physiologiques des plantes (Parent et Rivest, 2003)

Éléments mineurs	Symboles chimiques	Fonctions	Particularités
Fer	Fe	Rôle majeur dans la synthèse de la chlorophylle et les protéines	▪ 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	Mn	Participe à la production d'oxygène moléculaire lors de la photosynthèse	▪ 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 »
Cuivre	Cu	Impliqué dans la biosynthèse de la lignine, des alcaloïdes et des phytoalexines (antibiotiques contre les maladies)	▪ 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)
Zinc	Zn	Impliqué dans la photosynthèse	▪ 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
Molybdène	Mo	Nécessaire à la réduction du nitrate et à la fixation symbiotique du N ₂	▪ La carence se manifeste surtout chez les légumineuses et les crucifères et chez l'oignon cultivé en sol organique nouvellement mis en culture.
Bore	B	Rôle encore obscur. Les dicotylédones (feuilles larges) sont sensibles aux carences. Dans une plante bien pourvue de B, les organes reproducteurs sont plus viables	▪ Carence très répandue sous les climats très pluvieux favorisant le lessivage de l'acide borique dans les sols alcalins et argileux.
Chlore	Cl	Joue un rôle dans l'équilibre des charges et la régulation osmotique cellulaire	▪ Carence rare. La pluie seule suffit à couvrir les besoins des cultures en chlore dans les sols où les niveaux de chlore ne sont pas excessivement bas

Bien que les besoins en éléments mineurs des plantes soient faibles, des carences peuvent se traduire par une diminution du rendement et de la qualité de la récolte (Tran et al., 1995) et par l'inefficacité globale des engrais ajoutés. La carence peut aussi induire des désordres physiologiques comme le cœur brun des crucifères lors d'une carence en bore (CPVQ, 1994). Les sols organiques du Québec ne sont pas épargnés. Ouellette (1964) mentionne des carences possibles en bore (b), manganèse (Mn) et en cuivre (Cu).

1.2. La teneur des éléments mineurs dans le sol et leur disponibilité potentielle

La teneur des sols en éléments mineurs dépend surtout de leur nature pédologique et de leur texture (Giroux et al., 1992) mais également leur minéralogie notamment si les sols sont de nature calcaire ou silicieuse (Tyler et Zohlen, 1998). Cependant, la disponibilité potentielle des éléments mineurs de la plante est influencée par des facteurs anthropiques, notamment par les pratiques agricoles de fertilisation et le chaulage (Deschênes et al., 2006 ; Giroux et al., 1992).

1.2.1. Les types de sol : une dimension intrinsèque

Les séries de sol (particularités au niveau local) sont importantes à considérer pour les carences en éléments mineurs. En effet, selon l'élément mineur, la texture peut être indicatrice d'un potentiel de carence notamment les sols sableux et pauvres en matière organique (Tran et al., 1995). En général, les sols organiques sont souvent pauvres en ces éléments.

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 (physique du sol)
- Le pH
- La teneur en matière organique
- L'humidité du sol
- Le potentiel d'oxydo-réduction (aération et humidité du sol)

Précisons cependant que le pH est un des facteurs physico-chimiques du sol les plus importants quant à la disponibilité des éléments mineurs (Tran et al., 1995). En effet, l'acidité du sol les rend plus disponibles mis à part le molybdène pour lequel c'est le contraire.

Le tableau 3 mentionne le potentiel de carence en fonction du type de sol et des régions du Québec. Pour une bonne compréhension de la problématique, Il faut cependant être averti des considérations suivantes 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 que nous traiterons dans la prochaine section de cet article.

Dans le tableau 3, nous mentionnons les carences potentielles 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.

Tableau 3. Caresnces potentielles en éléments mineurs selon le type de sol et les régions du Québec (Tran et al., 1995)

Éléments mineurs	Symboles chimiques	Caractéristiques physico-chimiques des sols	Particularités
Fer	Fe	Généralement assez élevé dans les sols. Les carences sont plutôt observées dans les sols organiques	
Manganèse	Mn	Correction de l'acidité par le chaulage diminue le risque de toxicité mais accroît le risque de carence.	- 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	Cu	Carence surtout avec un pH élevé, en sols sableux, pauvres en Cu et riches en matière organique	- 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 Cu par la plante - Faibles teneurs possibles au 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	Zn	Carence surtout dans les sols dont le pH est >6,8 et riches en phosphore assimilable	Faibles teneurs possibles dans les régions : Saguenay et Lac St-Jean
Molybdène	Mo	Contrairement aux autres éléments mineurs, la disponibilité du Mo augmente avec l'augmentation du pH du sol	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	B	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)	- 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.

Pour la sensibilité des principales cultures du Québec aux carences des éléments mineurs nous vous suggérons les documents québécois de référence soit : Tran et al. (1995) et Parent et Rivest (2003) dans le guide de référence en fertilisation du CRAAQ.

1.2.2. Les pratiques agricoles : une dimension anthropique

Comme nous venons de le voir, la nature des sols est importante pour leur teneur naturelle en éléments mineurs. Il serait donc judicieux de savoir si vos champs sont à risque de carences pour certaines cultures.

Bien que les caractéristiques minéralogiques et physiques du sol soient relativement stables dans le temps, ce n'est pas le cas des propriétés chimiques particulièrement en agriculture où des pratiques peuvent modifier la disponibilité des éléments mineurs du sol. C'est en fait le cas des pratiques agricoles suivantes :

▪ 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. Nous approfondirons cet aspect dans un chapitre ultérieur.

1.3. Les carences : du symptôme à son contrôle

Bien souvent, les carences sont d'abord détectées au champ par des symptômes spécifiques selon la culture. 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. Mais l'observation visuelle est inefficace pour les effets assez subtils causant des pertes de 10 à 20% (A. Comeau, comm.pers.). L'analyse complète des sols agricoles est donc recommandée. C'est une pratique rentable et trop négligée.

Des grilles existent quant à la teneur optimale d'éléments nutritifs des tissus diagnostiqués de différentes cultures (Tran et al., 1995). Quant à l'analyse du sol, la méthode prépondérante au Québec est Mehlich-3 mais pour le bore, l'extraction à l'eau chaude demeure la méthode de référence.

L'interprétation des résultats d'analyses d'éléments mineurs mériterait l'aide d'un agronome car il faut prendre en compte un grand nombre de facteurs, soit les caractéristiques physico-chimiques du sol et les pratiques agricoles. Par exemple, dans un sol sableux, la teneur en manganèse (Mn) peut être acceptable, cependant si le pH est élevé (au-dessus de 6,8 par exemple), l'interprétation devrait être nuancée. En effet, lorsque le sol est facilement oxydé (potentiel redox élevé), comme cela peut être le cas dans des sols à pH élevés, la disponibilité des éléments mineurs peut être plus faible, particulièrement pour le manganèse (Mn). Il y aurait alors lieu de vérifier avec des analyses de tissus des cultures sensibles afin de mieux diagnostiquer la carence potentielle. Dans le cas de sol calcaire ou de sols surchauffés, le pH élevé va réduire la solubilité et la biodisponibilité des éléments mineurs à l'exception du molybdène (Mo) car sa disponibilité augmente avec le pH.

Bien qu'il soit important de mieux connaître ses sols au niveau des éléments mineurs, il n'est pas obligatoire de les analyser régulièrement, une fois chaque 4 à 5 ans est suffisant, ce qui représente un coût très mineur.

1.3.1. Le cas des semences

Dernièrement dans la revue « Grandes cultures », 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.

Des sols pauvres en manganèse (Mn) et en bore (B) produisent des grains à faibles teneurs de ces éléments ce qui a pour conséquence un établissement faible lorsque la culture doit croître dans un sol pauvre. Le problème n'est pas forcément réglé au complet avec une semence ayant une bonne teneur en éléments mineurs lorsqu'elle est semée dans un sol dont la disponibilité des éléments mineurs est très faible (Comeau et al., 2006). De là l'importance de bien connaître ses sols et d'être vigilant à la croissance de ses cultures.

Selon le Dr Comeau, « En conditions contrôlées, dans les cas extrêmes, 98 % environ des semences appauvries en bore ou en manganèse sont incapables de produire des épis au second cycle en sol pauvre ». Ce chercheur a notamment fait un test avec une culture d'orge dans un sol carencé en bore et 90 % des plantes ont été stériles.

Calderini et Ortiz-Monasterio (2003) ont démontré que des teneurs faibles en zinc et en manganèse réduisaient la vigueur des plantules de blé et diminuaient sa résistance à l'infection. Ce peut être le cas de la fonte des semis/piétin -échaudage causée par le champignon *Gaeumannomyces graminis* (ascomycota) (Rengel et al., 1996). Cette étude européenne a mis en évidence l'effet génotypique du blé dans l'efficacité à extraire des éléments minéraux comme le zinc et le manganèse. Ainsi, un génotype efficace à extraire ces éléments réduit en même temps les lésions du champignon. En effet, dans une culture d'un génotype inefficace à extraire les éléments mineurs et qui a été suppléé par une fertilisation à base de Mn et de Zn, le champignon a réduit certaines bactéries utiles de la rhizosphère du blé contrairement au génotype efficace. Ces résultats suggèrent donc que la microflore associée à la rhizosphère peut jouer un

rôle dans l'expression de l'efficacité du Mn et du Zn ainsi qu'à la résistance au piétin chez certains génotypes de blé.

Même au sein d'un épi de blé, la variabilité de la teneur en manganèse (Mn) dans les grains est très importante, car le haut de l'épi est moins riche en manganèse (Calderini et Ortiz-Monasterio 2003). Si le sol est le moins pauvre en manganèse, ceci peut donc influencer l'établissement au champ, le développement et le rendement d'une partie des grains semés. Une étude australienne sur l'orge et le lupin blanc a vérifié trois facteurs de variabilité de la teneur des grains en Mn (le site, la saison et le génotype) (Longnecker et Uren, 1990). Pour l'orge, le site a été le facteur le plus déterminant de la teneur en Mn du grain. Les différences entre les cultivars n'ont pas été statistiquement significatives. Une interaction saison*site significative a indiqué que la saison a affecté la teneur en Mn du grain sur le site ayant un sol déficient, ce qui n'a pas été le cas dans un sol non carencé. Dans un même site, la variabilité de la teneur de Mn dans le grain a été élevée quelle que soit l'espèce (blé, orge, fèverole). Dans le lupin et l'orge, une variation significative existait entre les graines de la même plante. Le manganèse allait de 1530 à 3750 mg kg⁻¹ pour le lupin blanc et de 11 à 24 mg kg⁻¹ pour l'orge (cv. Schooner). Selon les auteurs, dans l'orge et probablement pour la plupart des plantes, la variabilité de la teneur en Mn du grain peut être minimisée en sélectionnant les grains basés sur le poids à partir des parents cultivés au même site et dans la même saison. Cependant cette avenue ne semble pas être possible dans le cas du lupin blanc car la variabilité de teneurs élevées du grain en Mn n'a pu être associée au génotype ni au poids des grains.

Ce qui complique la situation, c'est qu'il n'est pas toujours facile de compenser une carence en manganèse (Mn) par la fertilisation comme le démontre une étude sur l'orge (Longnecker et al. 1991). Les chercheurs ont émis l'hypothèse qu'un usage de semences à haute teneur en Mn permettrait de réduire la carence de cet élément ce qui réduirait les pertes de rendement. On a comparé des semences ayant des teneurs en manganèse basses, moyennes et élevées du cultivar Galleon. De plus, certaines semences à faible teneur en Mn ont été trempées dans une solution de MnSO₄ avant le semis afin d'en rehausser leur teneur à un niveau moyen. Les semences à teneur élevée en Mn ainsi que les semences ayant profité du bain de MnSO₄ ont produit les meilleurs rendements d'orge dans un sol carencé en manganèse. Les semences qui avaient la teneur la plus élevée en Mn ont permis d'augmenter la matière sèche des racines, la teneur en Mn à la fois dans les racines et le feuillage, la matière sèche des tiges, le nombre de talles précoces, la survie des plants et le nombre de grains par plant. Mais il n'y a pas eu d'effet sur le poids des semences. Le rendement maximum en orge a été atteint à partir de semences ayant une concentration élevée en Mn et fertilisées avec un apport de manganèse.

Une étude réalisée en serre a évalué l'effet sur la croissance des plantules de deux cultivars de blé dont l'efficacité à absorber le zinc différaient (Rengel et Graham, 1995). Le semis a été fait en pot dans un sol sableux déficient en Zn auquel on a appliqué cinq doses de Zn allant 0 à 3,2 mg Zn kg⁻¹. Après trois semaines, les plantules du cultivar qui provenaient de semences ayant une teneur élevée en zinc ont produit une biomasse plus élevée dans les racines et la partie aérienne. Six semaines plus tard, cet état a été maintenu seulement dans le traitement sans fertilisation en Zn. Il semble donc que dans les trois premières semaines du semis (période importante pour l'établissement de la culture) la teneur élevée dans les semences peut agir comme un démarreur efficace; par la suite, c'est la capacité génétique de la plante à absorber le zinc qui entre en jeu.

1.3.2. Bénéfices de la fertilisation

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

Dans une étude polonaise qui portait sur des variétés de fèves (*Phaseolus vulgaris* L.), il semble que les différences de rendement et de teneur en éléments organiques des grains par exemple sont avant tout d'origine génétique si l'on considère l'effet de la fertilisation d'éléments mineurs comme le molybdène ou le bore (Janeczek et al., 2004). Cependant, par rapport au témoin, l'ajout de molybdène seul ou en combinaison avec du bore appliqué au début de la floraison a permis d'augmenter le nombre de gousses par 5 % et le poids des graines par plant et par conséquent le rendement en grains de 3 %.

Dans une étude estonienne où l'on ajoutait des éléments mineurs dans la fertilisation du colza (*Brassica napus* L.), l'ajout de Mo et Mn a permis d'augmenter de 1 % la teneur en huile de la plante. Ainsi, l'application foliaire de ces éléments mineurs a permis de compenser le manque de disponibilité du sol (Lääniste et al., 2004). Pour le manganèse, une correction dès l'apparition de symptômes est possible par une pulvérisation foliaire de sulfate de manganèse au stade végétal et ce de manière économique (Comeau et al. 2006). Pour le bore, ces auteurs mentionnent que la carence n'est identifiée que par l'analyse du sol et ainsi, elle peut donc être corrigée en intégrant cet élément dans la fertilisation.

Au Québec, Cheng (1994) a étudié l'effet d'une fertilisation incluant du bore (B) et du molybdène (Mo) dans les petits fruits et a constaté des effets bénéfiques sur la nutrition minérale et la qualité des fruits. C'est aussi le cas dans l'orge avec les variétés sensibles à cette carence, particulièrement dans la région Saguenay-Lac-Saint-Jean où sévit l'ergot des céréales (Pageau et al., 1995). Ces auteurs ont démontré qu'une fertilisation en bore permettait de réduire cette maladie dans l'orge tout en augmentant le rendement, le nombre de grains par épis mais par contre elle réduisait le poids de 1000 grains. Dans les sols sableux où le lessivage du Bore est possible, l'ajout de matière organique comme le compost peut réduire le lessivage et accroître la nutrition en bore des plantes (Yermiyahu et al., 2001).

Les agronomes Rivest et St-Pierre (2005) ont caractérisé les principaux types de fumier que l'on retrouve dans la Province pour leurs concentrations en éléments mineurs (Tableau 4). Leur article est donc une fiche technique indispensable. Pour les éléments tels que le cuivre (Cu) et le zinc (Zn), il serait en théorie assez facile de corriger leur carence à l'aide du lisier de porc, cependant les fumiers sont en général plus riches en éléments mineurs, particulièrement le fumier de poulet.

Pour les fumiers, ces auteurs ont comparé une fertilisation minérale à différents types de fumiers (bovins laitiers, poulet) et le lisier de bovin laitier dans le maïs et dans 20 sites afin de vérifier l'utilisation des éléments mineurs par le maïs au stade plantule puisque c'est à ce stade que les symptômes de carences se manifestent. L'analyse de sol l'année suivante voulait vérifier l'augmentation éventuelle de la teneur des éléments mineurs dans le sol.

Pour le fumier de poulet épandu au sol à l'automne à la dose de $12\text{t}^{-\text{ha}}$, on a constaté une faible augmentation du sol en zinc l'année suivante. Pour les autres types de fumier, aucune augmentation n'a été constatée car les apports en éléments mineurs étaient plutôt faibles. En effet, « il faut 2,23 kg d'un élément pleinement disponible pour augmenter le résultat de l'analyse de 1ppm » (Rivest et St-Pierre, 2005).

Leur essai de comparaison entre une fertilisation minérale et des engrais de ferme a démontré que le fumier de poulet ($12\text{t}^{-\text{ha}}$) et le fumier de bovin laitier ($34\text{t}^{-\text{ha}}$) lorsqu'ils sont épandus à l'automne ont eu un effet positif sur la croissance des plantules de maïs, augmentant le prélèvement des éléments mineurs (Cu, Mn, Zn et B). Par contre le lisier de bovin ($43\text{t}^{-\text{ha}}$) a semblé avoir peu d'impact sur les éléments mineurs. Certes, si la disponibilité du sol des éléments mineurs est suffisante pour la culture, les apports provenant des fumiers ne devraient pas avoir d'incidence sur les plantules.

Il est important de prendre en considération que les prélèvements en éléments mineurs des cultures varient (tableau 5) et que celles-ci ont une réponse relative aux apports par la fertilisation (tableau 6). Cette étude démontre aussi que la meilleure valorisation des fumiers s'obtient par une application automnale et un enfouissement au sol superficiel.

Toutefois, la réalité au champ peut être différente du résultat espéré et il faut donc garder l'œil bien ouvert pour évaluer le comportement de la culture. Rivest et St-Pierre (2005) mentionnent bien que « les facteurs du sol, comme le pH pour le zinc, l'aération pour le manganèse, la sécheresse pour le bore, ont souvent plus d'influence sur l'absorption des éléments mineurs que les faibles quantités apportées par les fumiers ».

Par surcroît, le cuivre est l'élément dont l'immobilisation par les microorganismes du sol et de la rhizosphère est la plus prononcée (Voss et Thomas 2001), et dans un sol microbiologiquement très actif, les besoins en cuivre peuvent être fortement accrus. Les travaux de Solberg et al.(1999) confirment la possibilité que les fumiers et lisiers peuvent assez souvent agir en immobilisant le cuivre. Voss et Thomas (2001) démontrent d'ailleurs un problème semblable mais de moindre magnitude avec le manganèse.

Une étude canadienne (Truro, Nouvelle-Écosse) qui a comparé le compost et l'engrais minéral dans la production de légumes n'a pas pu déterminer de manière constante l'augmentation d'éléments mineurs dans les légumes même si le sol limoneux-sableux avait reçu le même type de fertilisation pendant 12 ans et que les analyses Mehlich-3 des éléments mineurs (Mn, Zn et B) du sol étaient plus élevées avec le compost (Warman, 2000).

Tableau 4. Teneur d'éléments mineurs d'engrais de ferme (valeur médiane) (tiré de Rivest et St-Pierre, 2005)

Engrais de ferme	Bore (kg/t)	Cuivre (kg/t)	Manganèse (kg/t)	Zinc (kg/t)
Poulet (57 % M.S.)	0,018	0,055	0,193	0,224
Lisier de porc (2,9% M.S.)	0,002	0,009	0,014	0,046
Porc en engraissement (3,4% de M.S.)	0,003	0,026	0,018	0,047
Lisier de veau de grain (6% M.S.)	0,0018	0,0038	0,0132	0,0238
Pouponnière (2,6% M.S.)	0,003	0,033	0,017	0,235
Fumier de bovin laitier (17% de M.S.)	0,0044	0,0048	0,0215	0,0242
Purin de bovin laitier (1% de M.S.)	0,0006	0,0005	0,0011	0,0011
Lisier de bovin laitier (9% de M.S.)	0,0032	0,0040	0,0132	0,0160

Tableau 5. Prélèvement d'éléments mineurs selon certaines cultures (tiré de Rivest et St-Pierre, 2005 ; source : document de A&L laboratoire) (rendement en grains)

Cultures	Rendement kg/ha	Bore (kg/ha)	Zinc (kg/ha)	Manganèse (kg/ha)	Cuivre (kg/ha)
Avoine	3600	0,08	0,27	0,56	0,08
Blé	5000	0,09	0,38	0,62	0,1
Orge	5400	0,13	0,34	0,84	0,11
Mais	11200	0,19	0,57	1,35	0,15
Soya	4000	0,25	0,34	0,84	0,16
Luzerne	9000	0,78	0,73	1,23	0,20
Dactyle	5400	0,13	0,34	0,78	0,09
Mil	4500	0,12	0,35	0,50	0,09

Le tableau 5 nous indique que le bore est important pour les légumineuses, notamment la luzerne. Puisque cette culture répond très bien à l'apport de bore (tableau 6), en manque d'analyse de sol, il serait prévoyant d'inclure cet élément dans la fertilisation.

Tableau 6. Réponse relative de différentes cultures aux apports d'éléments mineurs (tiré de Rivest et St-Pierre, 2005 ; réf. Traylor Chemical, N.F.S.A.) : F= Faible ; M= Moyenne et E = Élevée

Cultures	Manganèse	Bore	Cuivre	Zinc	Molybdène
Luzerne	M	E	E	M	M
Orge	M	F	M	M	F
Trèfle	M	M	M	F	M
Maïs	M	E	M	E	F
Graminées	M	F	F	F	F
Avoine	E	F	E	F	F
Pois	E	F	F	F	M
Pomme de terre	E	M	F	M	F
Soya	E	F	F	M	M
Blé	E	F	E	M	F

Certes, en régie biologique, la correction d'une carence d'éléments mineurs à partir d'une fertilisation minérale, les produits utilisés doivent être acceptés par les organismes de certification. Pour plus de précisions, consulter le « Manuel des intrants biologiques » disponible au site web Agri-réseau (Duval, 2003). Pour certains produits, ce document vous avise de vérifier l'autorisation.

En cas de carence, il est donc permis d'intervenir avec des produits autorisés dans la mesure où il y a eu un diagnostic. Deux types de produits sont disponibles pour les éléments mineurs (oligo-éléments): les sources inorganiques (produit miniers) et les sources organiques (chélatés et engrais organiques) (Duval, 2003). Nous mentionnons dans le tableau 7 quelques produits autorisés selon les éléments mineurs.

Tableau 7. Quelques produits autorisés en agriculture biologique en cas de carence en éléments mineurs (Tiré de Duval, 2003).

Éléments mineurs	Nom commercial	Composition	Fournisseur	Teneur de la matière active/dose/type d'utilisation
Bore	Solubor (US Borax)	Dérivé de borate de sodium miné	Général (agricole)	20 % de bore. Pour pulvérisation foliaire
Cuivre	Sulfate de cuivre 25%		Général (agricole)	Appliqué au sol à une dose maximale de 44kg/ha
Fer	Oligo-Fer (oligosol)	Chélat de sulfonate de lignine avec fer	Synagri. Semico	
Manganèse	Sulfate de manganèse		Plant-Prod	29,5% de manganèse
Molybdène	Molybdate de sodium	Solution de molybdène	Général (UAP)	46% de molybdène. Seule source de molybdène autorisée. Version liquide
Zinc	Sulfate de zinc		Plant-Prod	35% de zinc

1.4. La toxicité

La toxicité des éléments mineurs est possible et provient toujours d'une grande disponibilité dans le sol, ce qui 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. Comme nous l'avons vu précédemment, un pH bas augmente la disponibilité des éléments mineurs sauf pour le molybdène pour lequel c'est l'inverse (Tran et al., 1995).

Selon Broadley (2006), la toxicité du manganèse est plus commune que la carence. Au Québec, c'est cependant la carence qui est la plus fréquemment rapportée. Cette toxicité est souvent la première qui apparaît dans les sols très acides. Les sols mal drainés sont aussi sensibles à cette toxicité. Peu de données québécoises existent sur ce problème potentiel, cependant, Cheng et Ouellette (1968) ont observé et documenté cette toxicité dans la pomme de terre en sols acides. Il est possible que dans les sols québécois acides, la toxicité de l'aluminium survienne avant ou masque la possibilité de celle du manganèse.

La toxicité du cuivre peut causer un problème à long terme car tous les métaux lourds s'accumulent dans le sol (Broadley, 2006). Ce problème pourrait survenir avec l'utilisation de sulfate de cuivre utilisé trop souvent ou à trop forte dose comme fongicide ou encore avec le lisier de porc.

Il n'y a pas de toxicité du molybdène dans les cultures. Cependant, une forte teneur dans les plantes consommées par du bétail peut créer la maladie dite la molybdénose (Broadley, 2006).

2. 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. Pour la situation du Québec, il est suggéré de se référer aux articles de Deschênes et al. (2006) ; Giroux et al. (2005) et Giroux et al. (1992).

Ce que l'on appelle communément les métaux lourds est aussi nommé les ÉTM pour « Éléments traces métalliques ». Nous les mentionnerons ainsi lorsque nous référerons à des articles scientifiques relativement récents

Dans le tableau 8, 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 9). Précisons que dans cet article nous mettons l'accent sur les métaux lourds qui sont aussi des éléments mineurs (Cu, Zn et Mo).

Tableau 8. 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 9. 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

Comme pour les éléments mineurs, la disponibilité des métaux lourds dans le sol est dépendante à la fois des caractéristiques physico-chimiques des sols ainsi que des pratiques agricoles.

L'étude de Giroux et al. (1992) mentionne les séries de sol du Québec et donc les régions où les teneurs des métaux lourds sont plus élevées (tableau 10). Précisons que les données des tableaux 10 et 11 présentent des teneurs totales des éléments mineurs. C'est donc dire que ces valeurs ne nous donnent aucune indication sur la disponibilité aux plantes.

Tableau 10 . Séries de sol du Québec et teneur des éléments mineurs et des métaux lourds dans l'horizon Ap (Giroux et al., 1992)

Éléments mineurs étant aussi des métaux lourds	Séries de sol à teneur faible	Séries de sol à teneur élevée
Manganèse (Mn)	Sols sableux	
Cuivre (Cu)		Ste-Rosalie, St-Urbain, Providence, Béarn, Guérin, Guyenne, Palmarolle et Laplaine Soit les sols argileux de la région de Montréal et de l'Abitibi-Témiscamingue
Zinc (Zn)	Sols sableux	De l'Anse, Kamouraska, St-Urbain, Béarn, Guyenne, Palmarolle, Roquemaure et Macamic Soit les sols argileux de la région de Montréal et de l'Abitibi-Témiscamingue.
Métaux lourds		
Cobalt (Co)		Ste-Rosalie, St-Urbain, Joseph , Dalhousie, Béarn, , Guyenne, Roquemaure, Macamic Soit les sols argileux de la région de Montréal et de l'Abitibi-Témiscamingue. Le sol sableux Joseph fait exception
Cadmium (Cd)		St-Urbain, Providence, Ste-Brigitte, Fleury, Béarn, Guérin, Guyenne et Roquemaure Ces sols se situent dans les régions de Montréal et de l'Abitibi-Témiscamingue. Le sol sableux Joseph fait exception
Nickel (Ni)		Ste-Rosalie, St-Urbain, Providence, Béarn, , Guérin, Nédélec, Palmarolle, Macamic Soit les sols argileux de la région de Montréal et de l'Abitibi-Témiscamingue. Le sol sableux Joseph fait exception

Dans le tableau 11, nous indiquons les teneur faibles des éléments mineurs (carences possibles) et les teneurs élevées des métaux lourds selon les analyses de 76 séries de sol du Québec (Giroux et al., 1992)

Tableau 11. Niveaux faibles des éléments mineurs et niveaux élevés des métaux lourds dans l'horizon Ap de 76 séries de sol du Québec (Giroux et al., 1992)

Éléments (mg/kg)	Niveau faible (éléments mineurs)	Niveau élevé
Cu	8,3	25,4
Co		19,1
Hg		0,050
Cd		1,3
Cr		51,6
Zn	20,4	83,5
Pb		35,9
Ni		31,3
Mn	144	530
Fe	8 000	28 110
Al	6 460	27 300

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. Il y a cependant une exception, celle de la série Joseph (sol sableux) qui a des teneurs parmi les plus élevées au Québec à cause d'une minéralogie particulière (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. Soulignons surtout que divers végétaux accumulent les métaux lourds vers la partie consommée de manière bien différente. Il existe de fortes différences génétiques entre cultivars chez le lin pour le cadmium, et les améliorateurs ont réussi à créer des cultivars qui absorbent moins de cadmium. Un succès semblable est noté pour le blé durum, espèce mal adaptée au Québec. Heureusement le blé à pain a naturellement une faible tendance à absorber le cadmium (A. Comeau, comm. pers.).

Les matières résiduelles fertilisantes (MRF) peuvent être une source potentielle d'ÉTM (Deschênes et al., 2006 ; Mench et Blaize, 2004) (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, CEAÉQ, 2005).

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.

Les ÉTM peuvent donc être des contaminants de l'environnement et ainsi induire un risque de toxicité de la chaîne alimentaire par le prélèvement des cultures et par l'accumulation dans les organismes vivants (des bactéries à l'humain). C'est le cas notamment pour les vers de terre qui accumulent ces éléments toxiques (Brewer et Barrett, 1995). La prudence est donc de mise.

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. Deschênes et al. (2006) ont utilisé le dactyle pelotonné, une graminée fourragère, dans le cadre d'une étude en serre afin de mieux comprendre cette dynamique sol-plante très complexe. Les résultats ont indiqué des niveaux de corrélation plutôt modérés entre l'analyse de sol et les prélèvements par la plante. En effet, les résultats ont été variables. Cependant, pour le Cu, Mn, Ni et Cd, la corrélation entre l'analyse du sol et le prélèvement du dactyle a été significative. Par contre, ce n'est pas le cas pour le Zn, Co, Cr et Pb. Les auteurs précisent qu'il ne faut pas en conclure que l'extraction chimique est sans valeur. D'autres facteurs moins connus peuvent avoir un effet sur la disponibilité. Ces facteurs incluent l'immobilisation par la rhizosphère et la génétique des végétaux. Les minéraux interagissent également entre eux ainsi qu'avec le pH et le potentiel redox (Huber et al., 1993).

En effet des études franco-américaines récentes en géochimie a permis de constater que certaines plantes semblent transformer les polluants métalliques des sols en substances moins toxiques pour elles, ce qui est le cas des graminées mais non des saules par exemple (Lanson, 2006). Précisons cependant que cette étude est un cas à partir duquel il n'est pas possible de tirer des conclusions générales. Les chercheurs ont tout d'abord observé la formation des

précipités métalliques (Mn et Zn) à proximité et à la surface des racines des graminées ce qui permet à la plante de diminuer son exposition aux métaux lourds. D'autres études plus sophistiquées à l'aide de la microscopie électronique ont indiqué que les métaux entraient bien par les racines et que leur présence était dans tous les tissus cellulaires de la plante mais avec une plus grande concentration dans le cylindre central de la tige, le canal qui achemine la sève brute vers le haut de la plante. Cette étude démontre que la toxicité des métaux lourds n'est pas forcément associée à la concentration de l'élément mais à sa spéciation (sa structure chimique) ce qui va déterminer sa mobilité, sa disponibilité et donc sa toxicité.

L'importation au sol d'ÉTM se fait par les engrais de ferme ainsi que par les matières résiduelles fertilisantes (MRF) de sources exogènes à l'agriculture et par les dépôts atmosphériques sur lesquels l'agriculteur n'a aucun contrôle. 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 comme nous l'avons mentionné dans les paragraphes précédents (Deschênes et al., 2006 ; Giroux et al., 2005).

Le tableau 12 permet d'identifier les sols qui ont subi une accumulation importante d'ÉTM d'origine anthropique (classe 5).

Tableau 12. Classification des teneurs en éléments traces métalliques des sols du Québec avec la méthode Mehlich-3 (mg/kg) (tiré de Deschênes et al., 2006)

Classe	Distribution percentile	Mn	Cu	Zn	Co	Cr	Cd	Ni	Pb
1	<25	<15,2	<1,1	<1,2	<0,15	<0,21	<0,05	<0,25	<1,6
2	25-50	15,2-25,3	1,1-1,8	1,2-1,9	0,15-0,22	0,21-0,27	0,05-0,07	0,25-0,36	1,6-2,1
3	50-75	25,3-35,0	1,8-2,8	1,9-3,0	0,22-0,29	0,27-0,42	0,07-0,10	0,36-0,57	2,1-2,6
4	75-99	35,0-98,6	2,8-9,0	3,0-14,0	0,29-1,18	0,42-0,75	0,10-0,24	0,57-2,05	2,6-5,7
5	> 99	>98,6	>9,0	>14,0	>1,18	>0,75	>0,24	>2,05	>5,7

Même pour les sols de classe 5, cela ne signifie pas que le risque de contamination de la chaîne alimentaire est pour autant élevé puisque le contrôle de la mobilité des ÉTM dépend aussi des propriétés physico-chimiques du sol. 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 centile 99% (classe 5) (tableau 12), 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, ce qui est l'objectif de cet article.

La connaissance des sols des producteurs est une première étape pour se faire un portrait juste des risques. Il y a aussi lieu d'évaluer les pratiques agricoles qui peuvent contribuer à l'accumulation des ÉTM dans le sol, notamment à partir de l'analyse des engrais de fermes et des matières résiduelles fertilisantes (MRF). Finalement on dispose de méthodes analytiques fiables pour un suivi détaillé dans les sols.

Pour compléter cette section, nous mentionnons quelques certains faits à propos des ÉTM à partir d'études françaises et autres :

- La teneur totale en métaux lourds n'est pas suffisant pour estimer le risque pour la chaîne alimentaire et l'environnement (Baize, 2000), mais elle est une première approche pour définir un état des lieux de la ferme.
- L'absorption des éléments des ÉTM par le blé et le colza est largement tributaire du type de sol, indépendamment des teneurs totales des sols (cité par Baize, 2000).
- « Pour certains types de sols, les variations des concentrations d'un même solum (volume réel effectivement observé dans une fosse, appréhendé à la main ou au couteau, éventuellement décrit et échantillonné : remplace désormais l'ancien terme de « profil ») sont importantes dans les Podzosols en particulier. Ces variations sont encore plus considérables lorsqu'un horizon d'accumulation de fer et/ou de manganèse est présent » (Baize, 2000). Ce pourrait être le cas au Québec. Voilà un argument supplémentaire pour réaliser un échantillonnage du sol représentatif.
- Il semble y avoir une forte relation entre la teneur totale en fer et la concentration en éléments de traces métalliques (ÉTM). « Plus il y a de fer dans un sol, plus forte sera la teneur en Co, Cr, Cu, Ni et Zn. Ce n'est pas le cas avec le cadmium et le plomb » (Baize, 2000).
- 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.
 - Les jardins urbains à proximité d'agglomérations ou d'un site industriel (Mench et Baize, 2004).

L'usage vétérinaire de produits à base d'arsenic chez la volaille peut laisser des résidus dans le fumier, qui deviennent alors des sources polluantes (Cortinas et al. 2006).

□ Il y a une différence d'absorption de métaux lourds selon les types de blé. « Dans une même situation pédo-climatique, le blé dur accumule plus de Zn, Cu et Ni que le blé tendre » (Mench et Baize, 2004).

□ Selon des enquêtes françaises, les végétaux les plus contaminés par le Cadmium (Cd) incluent les légumes feuilles (épinards, salade, céleri branche). « Pour la concentration en Pb, les produits végétaux se classent dans cet ordre : autres légumes>fruits>légumes feuilles>pommes de terre>céréales>légumes racines. L'exposition excessive des végétaux à Cu, Ni et Zn provoque souvent de la phytotoxicité. Elle empêche en général la récolte, ce qui évite l'exposition du consommateur » (Mench et Baize, 2004).

Mais au Canada, le cadmium peut se retrouver dans les légumes racines, et l'évolution du problème est à suivre, pour savoir si la tendance irait à l'augmentation. L'agence Canadienne d'Inspection des Aliments (ACIA) produit annuellement des données à ce sujet.

□ L'agriculture biologique n'est pas épargnée de la contamination selon une enquête française où on a comparé des légumes et des fruits à partir de fermes biologiques et conventionnelles situées à proximité l'une de l'autre (DGA, 2001). Par exemple dans cette étude restreinte, « les concentrations en Pb (600 vs 20 µg/kg) pour les carottes, (54 vs 10 µg/kg) pour les épinards et Cd (29 vs 10 µg/kg) dans les carottes et (95 vs 34 µg/kg) pour les épinards ont été plus élevées dans les carottes et les épinards biologiques. À l'inverse, les laitues conventionnelles pouvaient être plus contaminées en Pb (135 vs 22) ». De tels résultats pourraient provenir du choix des sols agricoles, et non des méthodes de régie. Davantage de recherche devrait préciser ces tendances.

□ En France, la situation de la contamination des sols par les ÉTM est généralement pas préoccupante à part des situations particulières que l'on a nommées, cependant, « l'évaluation des risques sanitaires et écotoxiques, notamment celle associée à une quantification des relations doses-effets reste trop embryonnaire » (Mench et Baize, 2004).

La nature des métaux lourds ou ÉTM est préoccupante à long terme puisque ces éléments s'accumulent dans le sol. Il y a donc lieu de s'éveiller à la prévention.

3. Les éléments mineurs et la qualité du grain : des carences alimentaires au développement de variétés efficaces en agriculture biologique

Le problème des carences en éléments mineurs touche de nombreux pays dans les deux hémisphères mais avec des conséquences plus désastreuses dans les pays en voie de développement, notamment au niveau nutritionnel (New agriculture international, 2006; Bouis et al., 2000). Des essais menés dans 190 sites répartis dans 15 pays ont démontré une carence en zinc dans 49 % des sites (Sillanpää, 1990). Toutes les cultures peuvent en être affectées mais le maïs, les fèves, le coton et le citronnier sont les plus sensibles. En Pologne, on estime qu'environ 76 % des sols contiennent peu de bore et 30 % peu de Molybdène (Janeczek et al., 2004).

Cette problématique mondiale est si préoccupante qu'un groupe de recherche international s'est créé en 1995 : Le groupe consultatif international du projet de recherche sur les éléments mineurs (The consultative group international research (CGIAR) micronutrients project). Ce projet vise à réunir tous les matériaux que les phytogénéticiens ont besoin pour développer des cultivars contenant des minéraux et des vitamines en quantité suffisante. Les cultures cibles sont le riz, le blé, le maïs, les fèves et le manioc. Les éléments mineurs et la vitamine visés sont le fer (Fe), le zinc (Zn) et la vitamine A. Il s'agit donc de développer des cultivars plus efficaces à l'extraction des éléments minéraux dans des sols carencés. En fait, ce que l'on considère être une carence dans le sol est avant tout une non disponibilité des éléments bien qu'ils soient abondants dans le sol. Cette amélioration végétale passe entre autre par le développement de racines abondantes

et efficaces. Il semblerait qu'en améliorant l'extraction d'éléments mineurs par la culture, la résistance aux maladies des racines augmente en parallèle. De même, ces plantes peuvent davantage explorer le sous-sol dans lequel elles peuvent utiliser des éléments minéraux et l'humidité (Bouis et al., 2000).

Quelques projets ont déjà mené à la production de cultivars efficaces à extraire des éléments mineurs. C'est le cas d'un blé pour des sols déficients en zinc en Australie et aux États-Unis, un soya adapté à des sols carencés en fer et un blé durum, cette fois pour éviter la toxicité du cadmium (Bouis et al. 2000). Ces études démontrent que lorsque les sols sont déficients en un élément mineur, une graine de semence qui contient une haute teneur de cet élément permet une meilleure germination, le développement d'une plantule ayant une vigueur plus grande et à la fois plus résistante aux maladies à ce stade très vulnérable (Bouis et al., 2000). Ces auteurs mentionnent comme exemple le cas du fer qui est le cinquième élément de la croûte terrestre mais dont la fraction soluble du sol et donc sa disponibilité par la plante est toute à fait faible puisqu'elle est considérée de 10^{-13} de l'ensemble du fer dans le sol. Ainsi, il ne s'agit plus d'adapter le sol pour la culture mais de faire en sorte que celle-ci soit adaptée au sol.

Une étude suédoise a analysé 13 éléments majeurs et mineurs dans le grain et les feuilles de 35 plantes sauvages majeures qui vivent à la fois dans les deux types de sols comparés (calcaires vs silicieux) (Tyler et Zohlen, 1998). Les concentrations en zinc (Zn) et en manganèse (Mn) étaient ou avaient la tendance d'être moindres dans les sols calcaires puisque le pH élevé rend ces éléments moins disponibles. Pour le molybdène (Mo), la moyenne était par contre plus élevée dans ce type de sol. Ces résultats ont permis de constater que pour les plantes sauvages, du moins pour le fer (Fe) et le manganèse (Mn), des éléments moins faciles à solubiliser en sol calcaire avaient un ratio de concentration grain:feuilles plus élevé dans les sols calcaires que dans les sols silicieux alors que le cas était inversé pour le calcium (Ca). Les auteurs parlent alors d'une stratégie végétale pour le développement des plantules adaptée au type de sol lorsque les éléments sont peu disponibles.

La comparaison d'analyses foliaires entre des cultures intercalaires et des mauvaises herbes semble illustrer cette stratégie végétale notamment pour des éléments mineurs comme le fer et le bore (tableau 13).

Tableau 13 : Analyses foliaires de plantes intercalaires et de mauvaises herbes selon l'espèce et le champ (Québec 2002) (Tiré de Estevez, 2004)

Numéro de champ		19	21	17	17
	Mesure	Blé-pois	Blé-pois	Seigle Automne	Mauvaises Herbes
N total	%	3,7	3,2	5,8	5,4
P total	%	0,54	0,52	0,8	0,74
Mg total	%	0,15	0,14	0,14	0,63
Ca Total	%	0,52	0,48	0,66	2,15
K total	%	5,16	5,97	6,59	5,86
Zn total	ppm	22	25,3	48,1	41,3
Cu total	ppm	7,46	8,46	12,2	11,5
Mn total	ppm	25,9	32,3	15,8	16,4
Fe total	ppm	116	142	161	218
B total	ppm	9	7,3	6,2	23,7

Parfois un élément mineur peut ne pas être essentiel à la plante mais l'être pour les humains et les animaux, comme c'est le cas du sélénium. En effet, le sélénium n'est pas essentiel à la plante, mais il l'est en doses précises, aux animaux et aux humains. Sa carence produit des effets graves sur le développement des muscles, du cerveau, et prédispose au cancer et à d'autres maladies. Les sols du Nord-Est de l'Amérique du Nord tendent à être pauvres en sélénium (Gupta, comm. Pers.). Notre apport en sélénium vient des crucifères, des légumineuses, mais également de divers produits importés. Par contre, les animaux nourris de produits du champ ont souvent besoin de suppléments de sélénium. Ainsi, on en injecte aux veaux pour lutter contre la mort des muscles causée par la carence aiguë en sélénium. En cas de carence grave, les animaux peuvent être affectés dans leur santé. Corriger un sol très pauvre en sélénium pourrait fondamentalement être une bonne idée, même si l'idée semble avant-gardiste. Mais il faut se rappeler que l'excès est toxique.

3.1. Le cas du blé

Comme céréale importante dans l'alimentation humaine, le blé a fait l'objet de nombreuses études d'amélioration végétale. Pour ce qui concerne la problématique des éléments mineurs, le « criblage variétal » permet de connaître l'efficacité des variétés à bien performer en sols où les concentrations d'éléments mineurs sont faibles. Des recherches dans les céréales d'hiver en Australie ont confirmé la possibilité d'améliorer l'efficacité des cultures pour être plus efficace à croître dans des sols carencés en manganèse (Mn) et en zinc (Zn) notamment dans le blé et l'orge (McDonald et al., 2001). Une étude pakistanaise a analysé la concentration en zinc de semences de diverses variétés de blé à partir de collections provenant de différents pays (Imtiaz et al. 2003). La variation entre les variétés était de 10,3 à 34,7 ug g⁻¹, la concentration la plus élevée provenait du cultivar « Pirsabak » d'origine du Pakistan.

D'un point de vue pratique, un grand nombre de petits grains aurait des incidences négatives pour le test du poids spécifique et l'efficacité à la meunerie (Calderini et Ortiz-Monasterio, 2003). De plus, des petites semences faibles en teneurs de Zn et de Mn affectent négativement la vigueur de la plantule et la résistance aux maladies. En effet, la grosseur de la semence est importante pour la rapidité d'émergence et la vigueur des plantules des céréales (Miam et Nafziger, 1992).

Calderini et Ortiz-Monasterio (2003) ont utilisé trois variétés de blé semées à deux dates différentes afin de mesurer la teneur en macronutriments et en micronutriments concentrés dans les grains en bas, au milieu et en haut de l'épi. Les poids et les teneurs de nutriments des grains localisés proches du rachis de l'épi ont été comparés à ceux qui sont localisés vers l'extérieur. Cette étude a démontré que la concentration des macro et micronutriments diminuait lorsque le grain s'éloignait du rachis et que le rendement en grain était généralement plus élevé dans la moitié de l'épi. Selon ces auteurs, l'augmentation du poids spécifique du grain de blé serait donc un objectif important dans l'amélioration végétale et ce sans sacrifier la qualité nutritionnelle du grain (Calderini et Ortiz-Monasterio, 2003). Selon ces auteurs, traditionnellement la recherche sur l'amélioration du blé tenait à accroître le nombre de grains sur l'épi au lieu d'accroître la grosseur du grain individuel. De la même manière, elle a eu tendance à concentrer ses effets à accroître le nombre de grains vers l'extérieur du rachis de l'épi. Les résultats de cette étude suggèrent donc de nouvelles priorités dans les programmes d'amélioration qui favoriseraient un meilleur rendement en augmentant le poids de chaque grain au lieu d'augmenter le nombre de grains. En se concentrant ainsi sur les grains proches du rachis de l'épi au lieu de ceux qui sont plus éloignés, il serait possible d'augmenter non seulement le rendement mais aussi un grain plus nutritif en augmentant la concentration des macro et micronutriments. Cette stratégie s'insère dans une recherche internationale qui vise à réduire la malnutrition, notamment les déficiences en fer, zinc et en vitamine A (Calderini et Ortiz-Monasterio, 2003).

Mentionnons que le phytogénéticien, André Comeau, développe du germoplasme de céréales depuis plus d'une décennie dans cette approche de rendre les cultivars plus efficaces à résister aux stress et à extraire les éléments nutritifs du sol. Dans des essais en sols pauvres en Mg, B et Mn, ce chercheur a constaté que si le cultivar Barrie était produit dans un sol carencé en un élément mineur, il ne pourrait être semé de nouveau dans un sol carencé du même élément, car le rendement sera très amoindri.

Conclusion

Cet article a pour objectif de sensibiliser les producteurs biologiques à la problématique des éléments mineurs dans les sols, que ce soit pour les carences ou les toxicités.

Cette sensibilisation devrait se concrétiser par une évaluation plus fréquente et plus poussée des sols de leur ferme dans le cas de teneurs élevées. Nous savons désormais qu'il existe au Québec des séries de sol et donc des régions qui sont plus à risque que d'autres. Étant donné que l'effet anthropique peut être important en agriculture, cette problématique devrait être abordée cas par cas. Comme la plupart des fermes ont des pratiques agricoles relativement stables, la teneur des éléments mineurs et des métaux lourds dans le sol n'évolue que lentement. Par conséquent, il serait judicieux d'investir à intervalles réguliers dans des analyses de sol afin de connaître la situation de la ferme, champ par champ.

Pour ce faire, il est pertinent de savoir que plus l'échantillonnage des sols est représentatif plus le portrait de l'état des lieux sera précis car la variabilité spatiale des éléments mineurs peut être importante. Une étude espagnole a évalué la teneur en Mn, Cu, Zn, et Co du sol dans une parcelle de 1,8 ha en utilisant une méthode d'échantillonnage appropriée pour utiliser la géostatistique qui prend en compte la variabilité spatiale des données (Paz et al., 1996). Cette étude a permis de constater que la distribution des éléments mineurs est fortement dépendante de la teneur en carbone du sol, la texture, la capacité d'échanges cationiques (CEC) et le pH. On a alors déterminé que pour obtenir un échantillon représentatif, 16 à 20 échantillons étaient nécessaires et que pour ne pas faire d'erreur de dépendance spatiale, la prise entre les échantillons devrait être d'une distance de 20 à 25 mètres. Par conséquent, il serait peut être pertinent de réaliser une carte des sols par GPS pour mieux prendre en compte ce facteur. Au Québec, Brunelle et Savoie (2000) ont ainsi déterminé que l'erreur spatiale est spécialement élevée avec le manganèse.

Le projet SPGBQ sur les éléments mineurs : Le besoin de la collaboration des producteurs biologiques

Dans le cadre du projet « Semences : développement et réseautage » du SPGBQ, le volet de l'état sanitaire des grains et semences permet depuis deux ans de collecter des résultats d'analyse de qualité des semences (pureté, taux de germination, contamination par les OGM) mais aussi le pourcentage de contamination des céréales par les *Fusarium*. Dès cette année, nous avons commencé une sensibilisation des producteurs biologiques à la problématique des éléments mineurs. Pour documenter notre base de données, nous avons besoin de votre collaboration. Nous vous invitons à nous faire parvenir une copie de vos analyses de sol ainsi que de tissus végétaux en cas de symptômes de carences. Un portrait même mineur d'une éventuelle problématique nous permettrait de manifester vos besoins au secteur de la recherche en agriculture biologique.

Contactez Bernard Estevez, agr. (agent de projet du SPGBQ)

Téléphone : 514-356-1687

Fax : 514-356-0699

b.estevez@sympatico.ca

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.

Bouis, H.E., R.D. Graham and M. Welch. 2000. The Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR) Micronutrients Project : justification and objectives. Food and Nutrition, Vol. 21 (4) : 374-381.

Brewer, SR, Barrett, GW. 1995. Heavy metal concentrations in earthworms following long-term nutrient enrichment. Bull. environ. Contam. Toxicol., 1995, 54, 120-127

Broadley, M. 2006. The minor elements. 2pp. Web page :

http://www.avocadosource.com/books/TraynorJoe1980/IDEAS_PG_70-71.pdf

Brunelle, A. and V. Savoie. 2000. Utilisation à la ferme des outils d'information géoréférencés en vue d'une optimisation des intrants et d'une diminution des pertes environnementales. Proj. Ent. Auxil. Canada-Québec Dév. Agro-alim. Rapport final. projet 24-810-255-0469. 31pp.

Calderini, D.F. and I. Ortiz-Monasterio. 2003. Grain position affects grain macronutrient and micronutrient concentrations in wheat. Crop Sc. 43 : 14115.

CEAEQ (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec). 2005. Processus et exigences d'accréditation des MRF : secteur agricole.

Cheng, B.T. 1994. Ameliorating *Fragaria* sp. and *Rubus idaeus* L. productivity through boron and molybdenum addition. Agrochimia. XXXV111 (3): 177-185.

Cheng, B.T. et Ouellette, G.J. 1968. Effect of various anions on manganese toxicity in *Solanum tuberosum*. Can. J. Soil. Sci. 52 : 274-277.

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.

Cortinas I., Field J.A., Kopplin M., Garbarino J.R, Gandolfi A.J., and Sierra-Alvarez R. 2006. Anaerobic Biotransformation of Roxarsone and Related N-Substituted Phenylarsonic Acids. Environ. Sci. Technol. 40 : 2951 – 2957.

CPVQ (Conseil de productions végétales du Québec). 1994. Répertoire des traitements antiparasitaires . AGDEX 250-605. MAPAQ. P.83-86.

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

DGAL (Direction générale de l'alimentation). 2001. Évaluation de l'exposition des consommateurs de produits issus de l'agriculture biologique et de l'agriculture conventionnelle aux résidus de pesticides, métaux lourds, nitrates, nitrites et mycotoxines. Notre alimentation, 37. 6pp.

Duval, J. 2003. Manuel des intrants bio. Club Bio-Action. 34pp.

Estevez, B. 2004. Diversification des cultures en régie biologique par l'intégration de plantes intercalaires dans le soya et le maïs à des fins multiples. Rapport final. 95p.

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.

Harter, R.D. 1983. Criteria for land spreading of sludges in the northlast-cooper, In Criteria recommendations for land application of sludges in the Northeast (USA), 94p.

Huber, D. M. and T. S. McKay-Buis. 1993. A multiple-component analysis of the take-all disease of cereals. Plant Disease. 77: 437-447.

Imtiaz, M. B.J. Alloway, K.H. Shah, S.H. Siddiqui, M.Y. Memon, M. Aslam and P. Khan. 2003. Zinc contents in the seed of some domestic and exotic wheat genotypes. Asian J. of Plant Sciences 2 (15-16) : 1118-1120.

Janeczek, E., A. Kotecki, M. Kozak. 2004. Effect of foliar fertilisation with microelements on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) development and seed yielding. Electronic Journal Polish Agricultural Universities, Agronomy, Vol. 7(1): 19pp.

Lääniste, P., J. Joudu and V. Eremeev. 2004. Oil content of spring oilseed rape seeds according to fertilisation. Agronomy research 2 (1) : 83-86.

Lanson, B. 2006. Face aux métaux, les plantes se défendent. CNRS. 2p.
<http://www2.cnrs.fr/presse/journal/3011.htm>

Longnecker, NE, NE Marcar and RD Graham. 1991. Increased manganese content of barley seeds can increase yield in manganese-deficient conditions. Australian J. of agricultural res. 42 (7) : 1065-1074.

Longnecker, NE, and C. Uren. 1990. Factors influencing variability in manganese content of seeds, with emphasis on barley (*Hordeum vulgare*) and white lupin (*Lupinus albus*). Australian J. of agricultural res. 41 (1) : 29-37.

McDonald, G.K., R.D. Graham, J. Lloyd, J. Lewis, P. Lonergan and B.H. Khabas-Saberi. 2001. Proceeding of the Australian agronomy conference, Australian Society of Agronomy.
www.regional.org.au/au/asa/2001/6/a/mcdonald.htm

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.

Miam, A.R. and E.D. Nafziger. 1992. Seed size effects on emergence head number and grain yield of winter wheat. *J. Prod. Agric.*, 5: 265-268.

New agriculture international. 2006. Micronutrient deficiencies around the world : current situation. www.newaginternational.com/current/producttrends200603.pdf. 9pp.

Ouellette, G. 1964. Importance des oligo-éléments dans l'agriculture québécoise. *Agriculture*. Vol. XX1(1) : 19-22.

Pageau, D., G. Charron, et R.R. Simard. 1995. Effet de la fertilisation en bore sur l'apparition de l'ergot chez l'orge. Résumé p. 45. 87^{ème} congrès de la société de protection des plantes du Québec. Sherbrooke.

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

Paz.A. M.T. Taboada, and M.J. Gomez. 1996. Spatial variability in topsoil micronutrient contents in a one-hectare cropland plot. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 27(3&4), 479-503.

Rengel, Z., R. Gutteridge, P. Hirsch and D. Hornby. 1996. Plant genotype, micronutrient fertilization and take-all infection influence bacterial populations in the rhizosphere of wheat. *Plant and soil*, Vol. 183 (2) : 269-277.

Rengel, Z. and R.D. Graham. 1995. Importance of seed zinc content for wheat growth on zn-deficient soil. 1. Vegetative growth. *Plant and soil*, Vol. 173(2) : 259-266.

Rivest, R. et M. Saint-Pierre. 2005. Les fumiers comme sources d'oligo-éléments pour le maïs. *Agri-vision 2005-2006*. 9pp.

Sillanpää, M. 1990. micronutrient assessment at the country level : an international study. *FAO . Soils Bulletin*. No 63. Rome.

Solberg E., Evans I, Penny D, and Maurice D. 1999. Copper deficiency: diagnosis and correction. *Agri-facts*, Agdex 532-3. Alberta Agriculture, Edmonton, AB.
[http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex3476/\\$file/532-3.pdf?OpenElement](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex3476/$file/532-3.pdf?OpenElement)

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.

Tyler, G. and A. Zohlen. 1998. Plants seeds as mineral nutrient resource for seedlings – A comparison of plants from calcareous and silicate soils. *Annals of Botany* 81 : 445-459.

Voss, M. and R. Thomas. 2001. Copper and manganese sorption by wheat rhizospheric bacteria. *Ciencia Rural*. 31: 947-951. (en portuguais)

Warman, P.R. 2000. Plant growth and soil fertility comparisons of the long-term vegetable production experiment: conventional vs compost-amended soils. In : *The Proceedings of the International Composting Symposium* (éd. : P.R. Warman et B.R.Taylor), CBA Press, Inc., Truro (NS) Canada, pp. 843-853.

http://www.organicagcentre.ca/ResearchDatabase/res_soils_veg_prod_pw_f.asp

Yermiyahu, U., R. Keren and Y. Chen. 2001. Effect of composted organic matter on boron uptake by plants. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* Vol.65 ; 1436-1441.

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.

G:\Agriculture biologique\Bio Syndicats\Grains Bio\Projets\Suite semences\Correspondances\Article éléments mineurs FINAL2.doc