

Anne-Marie Maltais

**Facteurs et conditions favorables à l'efficacité de la fertilisation foliaire
des cultures maraîchères du Québec**

Revue de littérature
présentée à
Dr Nicolas Tremblay, agr.
Centre de recherche et de développement
en horticulture
de St-Jean-sur-Richelieu
dans le cadre du cours
Sujets spéciaux BVG-62185

**FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
DÉPARTEMENT DE PHYTOLOGIE
UNIVERSITÉ LAVAL**

7 mars 2006

Facteurs et conditions favorables à l'efficacité de la fertilisation foliaire des cultures maraîchères du Québec

Résumé

L'application de fertilisants sur le feuillage des plantes horticoles est une pratique répandue mais controversée. Le processus par lequel la pénétration des fertilisants dans les parties foliaires peut avoir lieu est une série complexe d'événements interdépendants. Un nombre élevé de facteurs peut limiter son efficacité : formes chimiques des fertilisants, température, humidité, etc. (Bukovac et al, 2002). Plusieurs recherches ont ainsi conclu à l'inefficacité de cette méthode de fertilisation (Edmidten et al. 1994; Torres et al. 2002; Boaretto et al. 2002; Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar, 2002; Tojnko et al. 2002; Delfine et al. 2004; Haq and Mallarino, 2005). Plusieurs producteurs sont portés à user simultanément d'un pesticide pour diminuer les coûts reliés à l'application. Cette pratique demande réflexion. Elle pourrait, d'une part, résulter en une synergie entre le fertilisant et le pesticide (Alexander and Schroeder, 1987; Ryser, 1991; Schlegel and Schönherr, 2004), conduire à une amplification de la phytotoxicité et à des dommages sérieux sur la culture. D'autre part, cette pratique peut diminuer l'efficacité des fertilisants foliaires, par exemple en réduisant la vitesse de pénétration des nutriments (Schlegel and Schönherr, 2004). L'étude des nombreux facteurs limitants peut aider à obtenir une culture homogène et de qualité, et ce sans risques de phytotoxicité. Le tableau 1 indique que la fertilisation foliaire peut être une méthode efficace pour contrer les carences nutritives, dans les cas où toutes les conditions favorables à son efficacité sont respectées.

Introduction

Les ancêtres des plantes terrestres, les plantes aquatiques, ont la capacité d'absorber des minéraux par leurs organes foliaires. Bien que le processus d'évolution du règne végétal terrestre a conduit à la spécialisation des feuilles dans les mécanismes de la respiration cellulaire et de la photosynthèse, les plantes terrestres ont conservé ce vestige de leurs ancêtres aquatiques (Marschner, 1995). Depuis cette découverte, de plus en plus de producteurs font appel à la fertilisation foliaire pour combler les carences minérales de leur culture. Pourtant, ces producteurs demeurent septiques quant aux effets bénéfiques de cette pratique. La panoplie de publications d'articles scientifiques à cet effet indique qu'ils n'ont ni tort, ni raison.

De nombreux résultats de recherche démontrent clairement les effets positifs de la fertilisation foliaire sur la croissance, le développement et parfois même sur le rendement des cultures (Hannam et al. 1984; Xudan, 1986; Chitu et al. 2002; Starast et al. 2002; Toscano et al. 2002; Bly and Woodard, 2003; Silva et al. 2003; Williams et al. 2004; Yorinori et al. 2004), tandis que d'autres recherches montrent l'inefficacité de cette pratique (Edmidten et al. 1994; Torres et al. 2002; Boaretto et al. 2002; Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar, 2002; Tojanko et al. 2002; Delfine et al. 2004; Haq and Mallarino, 2005). Ces résultats divergents sont dus aux nombreux facteurs régissant l'efficacité de la fertilisation foliaire. Ces facteurs limitants sont, d'une part, reliés aux conditions climatiques, et d'autre part, à la nature même du ou des produits utilisés (Tremblay, 1991; Furuya and Uremiya, 2002; Bukovac et al. 2002; Silva et al. 2003). Tous ces facteurs agissent directement ou indirectement sur la pénétration stomatale et cuticulaire et la translocation des nutriments dans la plante entière. Les fertilisants foliaires utilisés sont confrontés à des barrières physiques considérables avant d'entrer dans le cytosol des cellules épidermales des feuilles (Mengel, 2002). Les conditions climatiques et la nature du ou des produits utilisés influencent significativement

l'efficacité de ces barrières au passage des micro et macroéléments (Schönherr, 2001; 2002).

Pour toutes ces raisons, la fertilisation foliaire ne devrait être utilisée que dans des cas exceptionnels, par exemple lorsque le niveau de compaction du sol est élevé et que l'absorption racinaire des minéraux est à un niveau anormalement bas (Marosz, 2004). Plusieurs recherches démontrent que l'utilisation de la fertilisation foliaire ne peut être une méthode alternative à la fertilisation racinaire, mais plutôt complémentaire (Ling and Silberbush, 2002; Starast et al. 2002; Toscano et al. 2002; Mengel, 2002; Mazhar et al. 2005). Toutefois, dans certains cas, son utilisation s'impose d'elle-même. Par exemple, dans des régions désertiques comme l'Arizona, le pH élevé et la faible teneur en eau du sol diminuent fortement la solubilité du zinc et rend son absorption racinaire inefficace (Walworth et al. 2006). Ainsi, dans certains cas où le rôle du système racinaire est restreint par les conditions du sol, la fertilisation foliaire devient beaucoup plus efficace que l'application conventionnelle des fertilisants au sol. Bien qu'il en demeure certaines inquiétudes sur l'efficacité de la fertilisation foliaire pour prévenir des carences minérales, son utilisation soutenue pourrait réduire la pollution des sols associée à la sur-fertilisation du sol, et dans un même temps réduire les coûts associés (Gooding and Davies, 1992).

Résultats et discussion

Le Tableau 1 tente de synthétiser l'information disponible et pertinente ayant trait à la fertilisation foliaire. Il résume les facteurs importants à considérer avant d'effectuer des applications foliaires et tente de plus de déterminer comment conduire la fertilisation foliaire de manière à retirer des aspects positifs sur la croissance et le développement de diverses espèces végétales.

Tableau 1: Facteurs influant et conditions favorables à l'efficacité de la fertilisation foliaire.

Facteurs	Conditions favorables	Références
FACTEURS RELATIFS À LA PLANTE		
Anatomiques		
Stomates	Humidité relative élevée; surface foliaire bien humidifiée préalablement; jour ¹	Eichert et al. 2002; Schlegel and Schönherr, 2002
Trichomes	En fonction du stade de développement et de l'espèce végétale ²	Hull et al. 1975
Cire épicuticulaire	Faible épaisseur ³	Swietlik and Faust, 1984; Chamel, 1988; Kirkwood, 1999
Cuticule	Absorption efficace en fonction de la charge du nutriment et du pH de la cuticule ⁴	Schönherr and Huber, 1977
- Cire cuticulaire	Faible épaisseur ⁵	Swietlik and Faust, 1984; Kirkwood, 1999
- Cutine	Contenu élevé de groupes polaires ⁶	Swietlik and Faust, 1984
Stade physiologique	Jeunes feuilles ⁷	Hull et al. 1975; Chamel, 1988; Tremblay, 1991; Kirkwood, 1999; Mengel, 2002; Bly and Woodard, 2003
Espèces végétales; cultivars	Surface foliaire élevée; faible épaisseur de cuticule ⁸	Kannan, 1986; Hesse and Griggs, 1950
FACTEURS EXTERNES		
Application	Tôt dans la saison de culture; applications répétées ⁹	Leece, 1978; Silva et al. 2003; Rashid and Ryan, 2004
Conditions climatiques		
Intensité lumineuse	Faible intensité lumineuse, mais présence de lumière ¹⁰	Tribe et al. 1968; Macey, 1970; Hallam 1970; Reed and Tukey 1982; Eichert et al. 2002; Schlegel and Schönherr, 2002
Température	Température moyennement élevée ¹¹	Leece, 1978; Chamel, 1988

Tableau 1: Facteurs influant et conditions favorables à l'efficacité de la fertilisation foliaire.

Facteurs	Conditions favorables	Références
Conditions climatiques (suite)		
Humidité relative (HR)		
- Point de déliquescence (POD) et hygroscopicité des sels minéraux	% HR élevée; faible POD des sels inorganiques ¹²	Eichert et al. 2002; Schönherr, 2001; 2002
Caractéristiques des éléments		
Mobilité des éléments	Mobilité élevée ¹³	Mengel, 2002
Sels organiques vs inorganiques	Sels inorganiques préférables ¹⁴	Schönherr, 2001; 2002; Furuya and Uremiya, 2002
Chélates vs. sels	Sels : absorption élevée Chélates : translocation élevée ¹⁵	Swietlik and Faust, 1984; Ferrandon and Chamel, 1988; Tremblay, 1991
Poids moléculaire	Faible poids moléculaire ¹⁶	Kannan, 1969; Furuya and Uremiya, 2002
Concentration	Faible concentration, application à plusieurs reprises ¹⁷	Chamel, 1988; Gooding and Davies, 1992; Eichert et al. 2002; Starast et al. 2002;
pH	Ajusté le pH en fonction des espèces végétales et du nutriment ¹⁸ ; pH constant ¹⁹	Cook and Boynton, 1952; Bukovac and Wittwer, 1959; Reed and Tukey, 1978; Chamel, 1988
Cations vs. anions	Cations ²⁰	Marschner, 1995; Furuya et Uremiya, 2002
Micro vs. macronutriments	Micronutriments ²¹	Alexander and Schroeder, 1987
Formes chimiques		
Azote (N)	Urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) > sels inorganiques > sels organiques ²²	Yamada et al. 1965a; 1965b; Marschner, 1995; Furuya and Uremiya, 2002
Potassium (K)	$\text{K}_2\text{CO}_3 > \text{KCl}; \text{KNO}_3; \text{KH}_2\text{PO}_4 > \text{K}_2\text{SO}_4$ ²³	Chamel, 1988; Schönherr, 2002
Phosphore (P)	H_3PO_4 ²⁴	Alexander and Schroeder, 1987; Tremblay, 1991
Magnésium (Mg)	$\text{MgCl}_2 > \text{MgEDTA}$ ²⁵	Alexander and Schroeder, 1987; Schönherr, 2002
Calcium (Ca)	$\text{CaCl}_2 > \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ²⁶	Chamel, 1988; Schönherr, 2002
Fer (Fe)	$\text{FeEDTA} > \text{FeSO}_4$ ²⁷	Fernández and Ebert, 2005; Rashid and Ryan, 2004
Zinc (Zn)	$\text{ZnCl}_2 > \text{ZnSO}_4; \text{Zn-lignosulfate}; \text{Zn-EDTA}$ ²⁸	Boaretto et al. 2002; Mengel, 2002
Cuivre (Cu)	$\text{CuNO}_3\text{-CH}_3\text{COOCu} > \text{CuSO}_4$ ²⁹	Chamel, 1988
Bore (B)	H_3BO_3 ³⁰	Mengel, 2002; Rashid and Ryan, 2004
Manganèse (Mn)	$\text{MnSO}_4\text{-MnCl}_2 > \text{Mn chélaté}$ ³¹	Ozaki, 1955; Ferrandon and Chamel, 1988
Molybdène (Mo)	Molybdate de sodium ³²	Williams et al. 2004
Dosage	Dose recommandée selon la culture et le type de carence ³³	n/d

Tableau 1: Facteurs influant et conditions favorables à l'efficacité de la fertilisation foliaire.

Facteurs	Conditions favorables	Références
Agents chélatants	Puissance modérée de l'agent chélatant; faible concentration ³⁴	Gélinas, 1996; Ferrandon and Chamel, 1988; Schönherr et al. 2005
Acide citrique	Amélioration de la translocation des éléments; très peu phytotoxique; faible coût ³⁵	Gélinas, 1996; Schönherr et al. 2005
EDTA	Amélioration de la translocation des éléments; coût plus élevé que l'acide citrique ³⁶	Gélinas, 1996; Modaihsh, 1997
Acide polyphénolique sulfonique	Faible concentration; risque de toxicité ³⁷	Gélinas, 1996; Schönherr et al. 2005
Lignosulfonate	Faible risque de phytotoxicité ³⁸	Raese and Staiff, 1988
Adjuvants	Faible poids moléculaire ³⁹	Kirkwood, 1999
Urée	Présence d'urée dans la solution fertilisante ⁴⁰	Bar-Akiva and Hewitt, 1959; Okuda and Yamada, 1962; Labanouskas and Puffer, 1964; Yamada et al. 1965a; 1965b; Kannan, 1969; Tremblay, 1991
Régulateur de croissance		
- Acide gibbéréllique	Augmentation de l'absorption chez certaines espèces ⁴¹	Kannan and Mathew, 1970
Osmoprotectant	En condition de stress hydrique ⁴²	Diaz-Zorita et al. 2001
Surfactants	Obtention de la tension critique de surface; HLB élevé (hydrophile/lipophile balance) ⁴³	Schönherr and Bukovac, 1972; Greene and Bukovac, 1974; Leece, 1976; Webb et al. 1999
Alcool éthoxylaté vs. alkyle polyglucoside	Alkyle polyglucoside ⁴⁴	Schönherr, 2001
Mélange de produits		
Pesticide	Synergie entre fertilisant et pesticide; sans accumulation de résidus toxiques ⁴⁵	Alexander and Schroeder, 1987; Ryser, 1991; Schlegel and Schönherr, 2004; Malusa and Tosi, 2005

¹ Le passage des nutriments par voie stomatale peut augmenter la rapidité d'absorption des nutriments. Une étude réalisée par Eichert et al. (2002) a démontrée que les stomates jouent un rôle important dans la pénétration foliaire des fertilisants, que l'absorption foliaire augmente avec l'augmentation de l'humidité relative et que cette absorption est particulièrement élevée lorsque l'humidité relative se situe au-delà du point de déliquescence de l'ion (uranine pour cette expérience). De plus, cette expérience a démontré le rôle important de la lumière sur la pénétration des nutriments. En présence de lumière, l'absorption est de 1.5 à 36 fois supérieure qu'en absence de lumière. Ces auteurs ont montrés que la lumière est un facteur important en corrélation avec le degré d'ouverture des stomates. Selon les résultats d'une expérience effectuée par Schlegel and Schönherr (2002), la pénétration initiale durant laquelle l'évaporation des gouttelettes à la surface des feuilles est de zéro s'effectue totalement par voie stomatale. Ils suggèrent donc que l'infiltration stomatale se produit lors de la pénétration initiale et qu'ensuite, lorsque la pénétration procède à partir de l'hydratation des résidus de sels, la pénétration par voie cuticulaire devient la voie majeure de passage des nutriments.

² En plus de la pénétration stomacale et cuticulaire, les plantes possèdent des structures apportant une tierce porte d'entrée aux nutriments, les trichomes ou poils absorbants. L'importance de l'absorption foliaire par les trichomes est en fonction de la maturité des feuilles, des espèces végétales et dépend d'autre part de certaines conditions environnementales (Hull et al. 1975).

³ La capacité d'hydrater une surface et la rétention d'un fertilisant foliaire dépend principalement de la morphologie et de la nature des groupes chimiques exposés (Chamel, 1988). Les cires épicuticulaire et cuticulaire sont composées de groupements très hydrophobes. La quantité de cire déposée à la surface des feuilles dépend, d'une part, de l'espèce végétale, et d'autre part, des conditions climatiques, soit la température, la lumière et l'humidité (Kirkwood, 1999). Plus l'épaisseur de cette barrière physique est élevée, plus le passage par voie cuticulaire des micros et des macronutriments en sera affecté. Certaines recherches ont montrées que la destruction de cette couche de cire augmentait l'absorption foliaire (Swietlik and Faust, 1984).

⁴ Selon une étude réalisée par Schönherr and Huber (1977) à partir de feuilles de citrons, de poires et d'abricots, lorsque la cuticule est à $\text{pH} > 3$, elle devient chargée positivement et est plus perméable aux anions. À $\text{pH} < 3$, la cuticule, au contraire, devient chargée négativement et devient donc plus perméable aux cations. Ainsi, selon le pH de la cuticule et sa charge, certains ions seront privilégiés. En d'autres termes, une application foliaire d'une solution avec un pH plus élevé que 3 aura pour conséquence de charger négativement la cuticule. La pénétration foliaire peut être augmentée par l'hydratation de la cuticule (Kirkwood, 1999).

⁵ Voir notes de fins de section se rapportant à la cire épicuticulaire.

⁶ La présence de groupes polaires dans les acides gras polyesterifiés qui composent la cutine rend cette dernière légèrement plus hydrophyle que les cires épicuticulaire et cuticulaire (Swietlik and Faust, 1984).

⁷ Selon Tremblay (1991), les jeunes feuilles se prêtent mieux à l'absorption foliaire que les feuilles plus âgées. L'âge des feuilles a des effets importants sur la composition et la quantité de cire produite (Kirkwood, 1999). Selon une étude réalisée par Hull et al. (1975), les feuilles âgées possèdent une plus grande résistance que les feuilles plus jeunes. Cette résistance est reliée au stade de développement des feuilles. Une feuille plus âgée aura atteint son niveau optimal de maturité et développé complètement ses barrières épidermales (cire épicuticulaire, cuticule). Cependant, en contradiction avec les articles précédents, un article écrit par Mengel (2002) a démontré que des feuilles plus âgées permettent une meilleure absorption des nutriments que les feuilles plus jeunes. Selon ce dernier, les feuilles âgées ont, d'une part, une surface foliaire plus élevée, ce qui permet d'optimiser la surface d'absorption des minéraux. En second lieu, les

feuilles plus matures peuvent être partiellement endommagées et contiennent des interstices ayant comme fonction de laisser passer par diffusion les éléments solubles. Selon une étude faite par Bly and Woodard (2003) à partir de blé, l'efficacité des applications foliaires d'azote est optimisée lorsque ces applications sont effectuées au stade de la postpollinisation. Enfin, la plupart des articles démontrent que le taux de pénétration cuticulaire des fertilisants est plus rapide par les jeunes feuilles (Tremblay, 1991; Kirkwood, 1999), tandis que la translocation de ces éléments est plus efficace dans les feuilles plus âgées (Chamel, 1988).

⁸ La rapidité avec laquelle un ou des nutriments sont absorbés par les feuilles diffère d'une espèce végétale à l'autre, et même d'un cultivar à l'autre. Selon Kannan (1986), cette différence est probablement due à la surface foliaire et sa structure différente entre espèces et cultivars. Hesse and Griggs (1950), ont démontrés qu'il existe des différences significatives entre le degré de surface foliaire mouillable chez différentes variétés de la même espèce.

⁹ L'efficacité des pulvérisations foliaires peut dépendre de la date de plantation, ou plutôt, du moment de la saison où la fertilisation foliaire est réalisée. Selon Leece (1978), des feuilles présentant le même âge physiologique auront une réponse différente aux fertilisants foliaires selon le moment de la saison. Des plants s'étant développés tardivement dans la saison de culture produiront une quantité plus élevée de cires sur la face abaxiale des feuilles. Une étude faite par Sylva et al. (2003) et comprenant des applications foliaires de bore a conclut que des conditions printanières, plus froides que lors des mois d'été, peuvent induire une meilleure utilisation des minéraux. Les carences en éléments comme le fer et le bore peuvent être corrigées par la fertilisation foliaire. Cependant, comme ces éléments sont pratiquement immobiles dans la plante, les applications doivent se répéter plusieurs fois (Rashid and Ryan, 2004).

¹⁰ L'épaisseur de la cutine et la présence de cire à sa surface est plus élevée dans des conditions de fortes que de faibles intensités lumineuses chez l'eucalyptus, les cultures de céréales et l'œillet (Macey, 1970; Hallam 1970; Reed and Tukey 1982). Eichert et al. (2002) ont montré que la lumière joue un rôle important dans la pénétration foliaire. La pré-illumination des feuilles d'une plante de type ornementale, *Sedum telephium*, a augmenté le taux de pénétration par un facteur de 1.5 à 36 comparé à des feuilles gardées à la noirceur avant le début de l'expérimentation. De plus, une autre étude a démontrée que le taux de pénétration par les stomates et les trichomes est plus élevé présence qu'en absence de lumière (Schlegel and Schönherr, 2002).

¹¹ Une étude conduite par Leece (1978) a montrée que de hauts régimes de températures augmentent l'expansion de la surface foliaire des pruniers et la production de cire à la surface des feuilles. Cependant, l'expansion de la surface foliaire due aux hautes températures est plus rapide que la production de cire par unité de surface. Ainsi, cet auteur conclut que l'expansion foliaire résultant des températures élevées a un effet positif sur l'absorption foliaire. Chamel (1988) a montré que la translocation du potassium dépend largement de la température. La translocation s'effectue très lentement à 4°C, et augmente rapidement jusqu'à 20°C. Par contre, cet auteur a noté une diminution de la rapidité de translocation entre 20 et 30°C.

¹² Une expérience réalisée par Eichert et al. (2002) a démontré que la pénétration foliaire est augmentée par l'augmentation de l'humidité relative et est particulièrement élevée lorsque l'humidité relative se situe au-dessus du point de déliquescence du nutriment. Le taux de pénétration est affecté par l'humidité au-dessus de la cuticule et par l'hygroscopicité des sels minéraux. Pour qu'il y ait pénétration, la dissolution des sels doit être effectuée. Cette dissolution est déterminée par le point de déliquescence (POD) des sels et par l'humidité des résidus de sels. POD est défini comme étant l'humidité au-delà de laquelle une solution saturée contient des sels sous état solide. Lorsque l'humidité au-dessus de la cuticule dépasse le POD du résidu de sel, la pénétration peut avoir lieu, tandis qu'une humidité au-dessous du POD aura pour conséquence la formation de résidus de sels solides et la cessation de la pénétration cuticulaire. Par conséquent, les sels utilisés pour la fertilisation foliaire auront avantages à avoir une valeur de POD la plus faible possible. Par exemple, certains sels ont une valeur de POD au-delà de 90% (K_2HPO_4 ,

KH_2PO_4 , KNO_3 , Ca-acétate, Ca-lactate et Ca-propionate). Ainsi, pour que la dissolution soit possible, l'humidité doit approcher 100%. Lorsque l'humidité est au-dessus de POD, le taux de pénétration des sels inorganiques augmente avec l'augmentation de l'humidité par un facteur de trois. Le taux maximum de pénétration foliaire a été mesuré à une humidité se situant entre 90 et 100% (Schönherr, 2001; 2002).

¹³ L'efficacité de la fertilisation foliaire dépend, entre autres, de la mobilité des éléments dans la plante. Le potassium et l'azote sont des exemples de nutriments avec une mobilité élevée. Cette mobilité permettra de distribuer rapidement les éléments à travers l'ensemble de la plante. Le calcium, le soufre et le fer sont, pour leur part, des éléments avec une faible mobilité dans le phloème. L'utilisation d'un agent chélatant, par exemple dans le cas du fer peut augmenter leur mobilité dans la plante (Mengel, 2002).

¹⁴ Schönherr (2001; 2002) a démontré que le choix d'un sel inorganique est préférable dû à son faible point de déliquescence (voir notes de fin de section se rapportant à l'humidité relative). Les sels inorganiques ont généralement un poids moléculaire inférieur à celui des nutriments sous forme organique. Plusieurs études ont démontrées que le taux d'absorption des nutriments diminue significativement avec l'augmentation de leur poids moléculaire (Kannan, 1969; Furuya and Uremiya, 2002). Cependant, certaines exceptions s'appliquent. Bien que l'urée soit un sel organique, son taux d'absorption a été trouvé supérieur dans la plupart des études par rapport aux autres sources d'azote, dont les sels organiques (Yamada et al. 1965a; Furuya and Uremiya, 2002).

¹⁵ La forme chélatée des nutriments semblerait augmenter la mobilité des éléments dans la plante et ainsi, favoriser leur absorption foliaire (Swietlik and Faust, 1984). La solubilité des éléments sous forme de chélate est plus élevée. Les formes chélatées sont moins susceptibles de causer des dommages aux feuillages et sont moins affectées par le pH des solutions. Ils semblent de plus mieux réagir que les sels inorganiques à la présence de plusieurs éléments ou de pesticides (Tremblay, 1991). Une étude conduite par Ferrandon et Chamel (1988) rapporte que la chélation du fer, du zinc et du manganèse augmente la translocation de ces éléments dans la plante. Cependant, leurs résultats indiquaient que l'absorption cuticulaire de ces éléments ferreux sous forme de sels inorganiques était plus élevée que sous forme de complexe chélaté (sels organiques).

¹⁶ Kannan (1969) a reporté que la pénétration des molécules organiques par la cuticule de *Euonymus japonicus* est inversement reliée à leur poids moléculaire. Selon une seconde étude, réalisée par Furuya and Uremiya (2002), le taux d'absorption d'azote augmente lorsque le poids moléculaire des acides aminés testés diminue. Par contre, cette corrélation n'est pas toujours présente. Par exemple, le taux d'absorption de l'arginine et de la L-lysine était significativement plus élevé que les autres acides aminés testés ayant le même poids moléculaire.

¹⁷ De fortes concentrations de fertilisants foliaires, devenant phytotoxiques pour les végétaux, peuvent sérieusement endommager les cultures et le rendement à la récolte. Par exemple, l'urée ou l'azote sous forme d'ammonium peut causer des brûlures ou la décoloration aux feuilles s'ils sont administrés en trop fortes doses sur le feuillage (Gooding and Davies, 1992). Une expérience conduite par Starast et al. (2002) a indiquée que l'utilisation de fertilisant foliaire sous forme de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ avec une concentration supérieure à 0.5% cause des dommages aux feuilles des plants de bleuets *Vaccinium angustifolium*. En l'occurrence, plusieurs applications étalées sur une plus longue période avec de faibles concentrations de fertilisants vont permettre une meilleure efficacité de la fertilisation et de minimiser les risques de phytotoxicité. En plus des risques possibles de phytotoxicité, une étude réalisée par Eichert et al. (2002) a montrée que le taux de pénétration foliaire global des nutriments augmente avec l'augmentation de la concentration des fertilisants foliaires (urarine dans ce cas-ci), mais diminue le taux de pénétration relatif à la dose appliquée. Cette diminution est d'autant plus importante en présence d'une humidité relative élevée. Ce résultat peut être expliqué par les effets du processus

d'évaporation : en présence d'une humidité relative et d'une concentration de solution élevées, le gradient de potentiel de l'eau est faible et résulte en une très faible évaporation des gouttelettes. Selon les résultats d'une expérience réalisée par Chamel (1988), l'augmentation de la concentration du potassium appliqué sur la partie aérienne de la plante induit une chute de l'absorption foliaire exprimée selon le pourcentage total appliquée. Cette réponse à la concentration élevée de nutriments propose une saturation des sites d'absorption.

¹⁸ Selon l'espèce végétale et le nutriment nécessaire pour contrer la carence minérale, l'absorption sera plus ou moins efficace selon le pH de la solution fertilisante. Par exemple, Reed and Tukey (1978) ont démontré que les feuilles de chrysanthèmes absorbent plus rapidement en présence d'un pH égale à 2. Le taux maximal d'absorption foliaire obtenue avec du phosphate de sodium était avec un pH entre 3 et 6, avec du phosphate de potassium à un pH entre 7 et 10, et avec du phosphate d'ammonium avec un pH se situant entre 3 et 10.

¹⁹ Selon Chamel (1988), des fluctuations de pH peuvent altérer la capacité d'échange ionique de la cuticule (voir notes de fin de sections se rapportant à la cuticule).

²⁰ Selon Marschner (1995), le taux d'absorption foliaire des ions ammonium devrait être plus rapide que les ions nitrate. La perméabilité membranaire envers des cations est augmentée par la présence d'un gradient de charges négatives le long des pores cuticulaires, tandis que les anions sont plutôt repoussés de cette région. Cependant, il faut tenir compte la différence entre le taux d'absorption des cations et des anions est aussi fonction de plusieurs autres facteurs, tels le pH et la solubilité des sels (voir Tableau I).

²¹ La quantité de macronutriments requise pour les besoins nutritifs de la plante est au-delà de la capacité d'absorption cuticulaire des fertilisants. À fortes concentrations, ces fertilisants conduiront à des brûlures foliaires. Les fertilisants foliaires à base de micronutriments sont plus efficace (Alexander and Schroeder, 1987).

²² Le taux d'absorption foliaire de l'urée a été trouvé supérieur dans la plupart des études par rapport à toutes les autres sources d'azote, dont les sels organiques (Yamada et al. 1965a; Furuya and Uremiya, 2002). Le taux d'absorption foliaire des ions ammonium a été trouvé plus élevé que pour les ions nitrate (Marschner, 1995).

²³ La capacité d'absorption foliaire du potassium sous formes de sels inorganiques diminue selon l'ordre suivant : $K_2CO_3 > KCl-KNO_3-KH_2PO_4 > K_2SO_4$. La capacité d'absorption foliaire élevée du potassium sous forme de K_2CO_3 peut être expliqué par la solubilité élevée de ce sel et par ses propriétés hygroscopiques (Chamel, 1988). Une étude conduite par Schönherr (2002), montre que le faible point de deliquescence (POD = 56%) du K_2CO_3 lui confère une facilité de pénétration plus élevé que pour les autres formes énoncés ci haut (POD à plus de 90%).

²⁴ La source de phosphore absorbée la plus rapidement serait sous forme H_3PO_4 (Alexander and Schroeder, 1987; Tremblay, 1991).

²⁵ L'absorption du Mg à partir de Mg chélaté avec du EDTA peut avoir lieu à une humidité relative au-dessus de 65%, tandis que l'absorption du Mg à partir de sulfate de magnésium requière une humidité relative de plus de 80% (Alexander and Schroeder, 1987). Cependant, une étude plus récente montre que le point de déliquescence (POD) du $MgCl_2$ est très faible (33%), ce qui lui confère une bonne capacité de pénétration dans la cuticule, et ce, sans une humidité relative trop élevée (Schönherr, 2002). Il serait donc plus avantageux d'utiliser le $MgCl_2$ en considérant les coûts plus élevés de l'utilisation d'un agent chélatant.

²⁶ Le chlorure de calcium ($CaCl_2$) est facilement absorbé par la cuticule (Chamel, 1988). Schönherr (2002) a trouvé que calcium sous forme de $CaCl_2$ est un sel inorganique efficace pour la nutrition foliaire due à son faible point de déliquescence de 33%. Le calcium sous forme de $Ca(NO_3)_2$ pénètre moins facilement dans la cuticule (POD = 56%).

²⁷ Selon la littérature, l'application foliaire du fer la plus raisonnable demeure la avec du fer chélaté non chargé ou chargé négativement (Fernandez and Ebert, 2005). La chélation du fer avec du EDTA est répandue au Québec. Cependant, en conditions alcalines, tous les agents chélatants

sont instables dans l'environnement. Dans ces conditions, le FeEDDHA devient plus efficace que les sels ou les Fe chélatés avec d'autres agents (Rashid and Ryan, 2004).

²⁸ Selon les résultats d'une étude conduite par Boaretto et al. (2002), le zinc sous forme de chlorure est une source mieux adaptée à la fertilisation foliaire. Le sulfate est plus difficilement absorbé. Seulement environ 6% de Zn a été absorbé par les feuilles lorsque la source de Zn était sous forme de sulfate. Sous forme de chlorure, approximativement 92% du Zn était absorbé. Bien que le Zn sous forme de chlorure soit une source plus efficace de Zn pour la pénétration foliaire, il a causé des symptômes de toxicité sur les feuilles. Les résultats ont de plus montré que l'utilisation d'agents chélateurs (EDTA et lignine sulfonate) n'augmente pas le pouvoir d'absorption foliaire du Zn chez les plants de *Citrus sinensis*. Pour cette étude, moins de 1% de Zn étaient transportés aux autres organes de la plante. Mengel (2002) a de plus rapporté qu'il n'y a pas de différence entre la concentration dans les feuilles suite à des applications faites à partir de ZnSO_4 et de ZnEDTA ou de Zn-lignosulfate.

²⁹ L'absorption foliaire du cuivre est significativement plus faible pour le sulfate de cuivre que pour le nitrate et l'acétate de cuivre chez le maïs (Chamel, 1988).

³⁰ Selon Rashid and Ryan (2004), la fertilisation foliaire du bore peut être effectuée à partir d'acide borique (H_3BO_3) ou de borate de sodium ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$). Mengel (2002) rapporte que le bore sous forme d'acide borique est relativement mobile et est donc souvent utilisé dans la fertilisation foliaire.

³¹ Ferrandon and Chamel (1988) rapportent que l'absorption cuticulaire du manganèse est plus faible lorsqu'il est chélaté avec de l'EDTA que sous forme inorganique (sulfate et chlorure). Par contre, la translocation du manganèse était supérieure lorsqu'il formait un complexe avec l'agent chélatant. Compte tenu des coûts élevés des chélates organiques par rapport aux fertilisants traditionnels comme les sels sous forme de sulfate, les effets bénéfiques des agents chélatants sur la translocation du Mn ne justifient pas son utilisation a priori. De plus, Ozaki (1955) a rapporté que les applications faites à partir de MnSO_4 sont plus efficaces que le Mn avec un agent chélatant.

³² Williams et al. (2004) ont démontré que des applications foliaires de molybdate de sodium étaient efficaces pour optimiser le développement des raisins de type Merlot. Comme les carences en molybdène sont très rares dans les cultures maraîchères, la littérature à ce sujet est restreinte.

³³ Les informations valables et pertinentes portant sur les doses recommandées selon la culture et le type de carence sont très restreintes et peuvent difficilement s'appliquer aux conditions climatiques du Québec. En effet, pour le moment, les expériences sur la fertilisation foliaire ont pratiquement toutes été effectuées dans des régions éloignées et bien différentes du Québec. Des expériences ont toutefois été réalisées au Québec par les compagnies de fertilisants foliaires (Oligosol, Fertichem, Agro-100), mais les résultats sont confidentiels.

³⁴ L'efficacité d'un agent chélatant dépend de sa capacité (puissance) à emprisonner les cations métalliques. Cependant, la puissance de cet agent doit être modérée afin qu'il permette les échanges cationiques nécessaires avec la plante pour contrer les carences nutritives (Gélinas, date inconnue). L'utilisation d'un agent chélatant peut être justifiée lors d'application foliaire d'éléments peu mobiles dans la plante. En effet, la chélation peut augmenter la translocation des éléments dans la plante. Selon Ferrandon and Chamel (1988), l'absorption cuticulaire du manganèse est plus faible lorsqu'il est chélaté avec de l'EDTA que sous forme inorganique (sulfate et chlorure). Par contre, la translocation du manganèse était supérieure lorsqu'il formait un complexe avec l'agent chélatant. Schönherr et al. (2005) ont démontré que la concentration des agents chélatants doit être la plus faible possible. Le temps de pénétration foliaire du Fe chélaté avec de l'EDTA augmente avec l'augmentation de la concentration du complexe chélaté. Cette étude suggère que l'augmentation du Fe chélaté diminue la dimension des pores aqueux dans la membrane cuticulaire.

³⁵ Le taux de pénétration du fer chélaté avec de l'acide lignosulfonique, de l'acide citrique et de l'EDTA ne montre pas de différence significative (Schönherr et al. 2005). Le faible coût d'utilisation de l'acide citrique, de même que sa présence naturelle dans les végétaux, fait gagner en popularité cet agent chélatant par rapport aux autres disponibles sur le marché (Gélinas, date inconnue).

³⁶ Plusieurs études ont montré que l'application foliaire d'oligo-éléments chélatés, tel l'EDTA, peut augmenter la translocation de ces éléments vers tous les organes des plantes (Rashid and Ryan, 2004; Fernandez and Ebert, 2005). Toutefois, d'autres aussi nombreuses se penchent vers l'utilisation des sels plutôt que d'éléments chélatés. L'utilisation du EDTA peut augmenter la translocation des minéraux (Wittwer et al. 1965; Ferrandon and Chamel, 1988). Cependant, selon une Modaihsh (1997), l'utilisation de micronutriments sous formes de sulfate est plus efficace que sous forme chélatée dû à son coût d'utilisation plus faible. Par contre, pour obtenir une efficacité similaire qu'avec les formes chélatées, le taux d'application des sulfates doit être plus élevé.

³⁷ Gélinas (date inconnue), rapporte que l'utilisation de composés à base de phénol, tel l'acide polyphénolique sulfonique peut être toxique pour les humains.

³⁸ Selon les résultats d'une étude réalisée par Raese and Staiff (1988), l'utilisation de lignosulfonate résulte en la plus faible quantité de résidus phytotoxique dans les fruits des poires par rapport aux autres agent chélatants testés dans cet expérience : acide polyphénolique sulfonique, HEEDTA et EDTA.

³⁹ Au Québec, les adjuvants, sauf l'urée, sont plutôt utilisés en combinaison avec des pesticides. Les adjuvants augmentent le taux de pénétration cuticulaire par ses effets positifs sur la surface de tension critique. Certains adjuvants, dits accélérateurs (ex. : tributylphosphate), ont un effet sur la viscosité de la cire épicuticulaire (Kirkwood, 1999).

⁴⁰ La présence d'urée dans la solution fertilisante facilite la pénétration des autres nutriments dans les feuilles. La cuticule est de 10 à 20 fois plus perméable à l'urée qu'aux ions inorganiques (Yamada et al. 1965a; 1965b). Plusieurs auteurs ont démontrés que l'ajout d'urée dans la solution fertilisante augmente l'efficacité des applications foliaires contenant du P, Mn, S, Mg et du Fe chez différentes espèces de végétaux (Bar-Akiva and Hewitt, 1959; Okuda and Yamada, 1962; Labanouskas and Puffer, 1964). Cependant, l'urée doit être exempte de biuret, un produit ayant des effets phytotoxiques et pouvant être intégré au fertilisant lors de sa synthèse (Tremblay, 1991). En contradiction avec les articles précédents, Kannan (1969) a trouvé que des applications foliaires de FeSO_4 ou de FeEDDHA avec de l'urée diminuait le taux de pénétration du Fe dans les feuilles de l'espèce *Euonymus japonicus*.

⁴¹ Selon une étude faite par Kannan and Mathew (1970), l'absorption foliaire du fer peut être augmentée avec une application foliaire d'acide gibbéréllique. Cependant, l'utilisation des régulateurs de croissance n'est pas autorisée au Québec pour les cultures maraîchères.

⁴² Dans une région où des périodes de sécheresse peuvent survenir lors de la croissance du blé, l'application foliaire de fertilisants et de glycinebétaine (osmoprotectant) au stade végétatif peut favoriser et augmenter la récolte des grains (Diaz-Zorita et al. 2001).

⁴³ Selon Leece (1976), l'utilisation de surfactants peut permettre d'améliorer la mouillabilité sur les feuilles en diminuant la tension de surface. Cette diminution de la tension de surface réduit l'angle de contact entre la solution et la surface foliaire. La tension de surface critique permet d'obtenir le maximum de mouillabilité et d'augmenter la pénétration par voie stomatale et cuticulaire (Schönherr and Bukovac, 1972). D'autres part, le ratio hydrophile/lipophile (HLB) peut permettre de déterminer l'efficacité d'un surfactant. Une étude réalisée par Hull et al. (1975) a montré que des valeurs élevées de HLB indiquent habituellement qu'un surfactant peut améliorer l'absorption foliaire des nutriments. Une étude effectuée par Webb et al. (1999) a montrée que l'utilisation de certains surfactants réduit le nombre de sauts entre le premier impact des gouttelettes et la rétention et augmente la vitesse de capture suivant cet impact. Bien qu'il

existe un nombre élevé de surfactants sur le marché, au Québec, ces types de produits ne sont utilisés que pour l'application de pesticides (Claude Gélinas 2006; communication personnelle).

⁴⁴ Schönherr (2001) a montré que la pénétration cuticulaire peut être augmentée par l'ajout d'un surfactant composé d'alkyle polyglucoside. Contrairement aux alcools étholylatés, les composés d'alkyle polyglucoside ne sont pas phytotoxiques.

⁴⁵ L'application d'un mélange de fertilisants foliaires et de certains pesticides peut augmenter l'efficacité de ces pesticides (Alexander and Schroeder, 1987; Ryser, 1991). Schlegel and Schönherr (2004) ont reporté que le mélange de chlorure de calcium avec un fongicide de formulation commerciale résultait en une pénétration cuticulaire lente du calcium dans les pommes. Une étude conduite par Malusa and Tosi (2005) effectuée à partir de pommiers montre que la combinaison entre l'application foliaire d'un fertilisant à base de phosphore et d'un fongicide à base de phosphonate (Aliette[®]) induit une accumulation de résidus phosphites dans les fruits excédant la limite permise.

Conclusion

L'efficacité de la fertilisation foliaire est imprévisible. Cependant, son efficacité peut être réelle et palier aux carences en nutriments des plantes par l'étude approfondie des facteurs limitants. L'efficacité de la fertilisation foliaire dépend de l'absorption et de la mobilité des éléments dans la plante entière (Mengel, 2002). Son efficacité peut être optimisée par le jumelage d'agents chélatants, d'activants ou de surfactants. Toutefois, ces produits supplémentaires peuvent parfois conduire à un taux de pénétration plus faible ou à des dommages irréversibles.

Références

Alexander A. and M. Schroeder. 1987. *Modern trends in foliar fertilization*. Journal of Plant Nutrition 10(9-16): 1391-1399.

Bar-Akiva A. and E.J. Hewitt. 1959. *The effects of triiodobenzoic acid and urea on the response of chlorotic lemon (Citrus limonia) trees to foliar application of iron compounds*. Plant Physiology 34(6): 641-642.

Bly A.G. and H.J. Woodard. 2003. *Nitrogen management: foliar nitrogen application timing influence on grain yield and protein concentration of hard red winter and spring wheat*. Agronomy Journal 95: 335-338.

Boaretto A.E., Boaretto R.M., Muraoka T. Nascimento Filho V.F., Tiritan C.S. and F.A.A. Mourão Filho. 2002. *Foliar micronutrient application effects on citrus fruit yield, soil and leaf Zn concentrations and ⁶⁵Zn mobilization within the plant*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 203-209.

Bukovac M.J. and S.H. Wittwer. 1961. *Absorption and distribution of foliar applied mineral nutrients as determined with radioisotopes*. Reuther, Walter (ed). Plant Analysis and Fertilizer Problems. Washington 6, D.C.: American Institute of Biological Science. pp. 215-230.

Bukovac M.J., Cooper J.A., Whitmoyer R.E. and R.D. Brazee. 2002. *Spray application plays a determining role in performance of systemic compounds applied to the foliage of fruit plants*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 65-75.

Chamel A. 1988. *Foliar uptake of chemicals studied with whole plants and isolated cuticles*. Neumann P.M. (ed). Plant growth and leaf-applied chemicals. Boca Raton, FL: CRC Press. pp. 27-48.

Chitu, V., Coman M., Bulgaru L. and E. Chitu. 2002. *Effects of "CalMax" and "Nutri Vit" foliar fertilisers on plants growth and strawberry fruit quality*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 475-480.

Cook J.A. and D. Boynton. 1952. *Some factors affecting the absorption of urea by McIntosh apple leaves*. Proceedings of the American Society for Horticultural Science 59: 82-90.

Delfine S., Tognetti R., Desiderio E. and A. Alvino. 2005. *Effect of foliar application of N and humic acids on growth and yield of durum wheat*. Agronomy for Sustainable Development 25: 183-191.

Diaz-Zorita M., Fernández-Canigia N.V. and G.A. Grosso. 2001. *Applications of foliar fertilizers containing glycinebetaine improve wheat yields*. Journal of Agronomy and Crop Science 186: 209-215.

Edmisten, K.L., C.W. Wood, and C.H. Burmester. 1994. *Effects of early-season foliar fertilization on cotton growth, yield and nutrient concentration*. Journal of Plant Nutrition 17(4): 683-692.

Eichert T., Burkhardt J. and H.E. Goldbach. 2002. *Some factors controlling stomatal uptake*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 85-90.

Etzion, O. and P.M. Neumann. 1993. *Screening for phyto-toxic contaminants in an industrial source of nutrients intended for foliar and root fertilization*. Journal of Plant Nutrition 16(8): 1385-1394.

Ferrandon M. and A.R. Chamel. 1988. *Cuticular retention, foliar absorption and translocation of Fe, Mn and Zn supplied in organic and inorganic form*. Journal of Plant Nutrition 11(3): 247-263.

Fernández, V. and G. Ebert. 2005. *Foliar iron fertilization: a critical review*. Journal of Plant Nutrition 28(12): 2113-2124.

Furuya S. and Y. Umekiya. 2002. *The influence of chemical forms on foliar-applied nitrogen absorption for peach trees*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 97-103.

Gélinas C. 1996. *Les oligo-éléments chélatés*. Les Services NPK+. 5 p.

Gooding, M.J. and W.P. Davies. 1992. *Foliar urea fertilization of cereals, a review*. Fertilizer Research 32(2): 209-222.

Green D.W. and M.J. Bukovac. 1974. *Stomatal penetration: effect of surfactants and role in foliar absorption*. American Journal of Botany 61(1): 100-106.

Hallam N.D. 1970. *Growth and regeneration of waxes on the leaves of Eucalyptus*. Planta 93: 257-268.

Hannam R.J., Davies W.J., Graham R.D. and J.L. Riggs. 1984. *The effect of soil- and foliar-applied manganese in preventing the onset of manganese deficiency in Lupinus angustifolium*. Australian Journal of Agricultural Research 35: 529-538.

Haq M.U. and A.P. Mallarino. 2005. *Response of soybean grain oil and protein concentrations to foliar and soil fertilization*. Agronomy Journal 97: 910-918.

- Hesse C.O. and W.H. Griggs. 1950. *The effect of gland type on the wettability and water retention of peach leaves*. Proceedings of the American Society for Horticultural Science 56: 173.
- Hull H.M., Morton H.L. and J.R. Wharrie. 1975. *Environmental influences on cuticle development and resultant foliar penetration*. Botanical Review 41: 421-451.
- Kannan S. 1969. *Penetration of iron and some organic substances through isolated cuticular membranes*. Plant Physiology 44(4): 517-521.
- Kannan S. and T. Mathew. 1970. *Effects of growth substances on the absorption and transport of iron in plants*. Plant Physiology 45(2): 206-209.
- Kannan S. 1986. *Foliar absorption and transport of inorganic nutrients*. Critical Reviews in Plant Sciences 4(4): 341-375.
- Khan, M.M.A., Samiullah, S.H. Afaq and M.M.R.K. Afridi. 1992. *Yield and quality of fennel (Foeniculum vulgare Mill) in relation to basal and foliar application of nitrogen and phosphorus*. Journal of Plant Nutrition 15(11): 2505-2515.
- Kirkwood R.C. 1999. *Recent developments in our understanding of the plant cuticle as a barrier to foliar uptake of pesticides*. Pesticide Science 55: 69-77.
- Labanauskas C.K. and R.E. Puffer. 1964. *Effects of foliar applications of manganese, zinc and urea on Valencia orange yield and foliar composition*. Proceedings of the American Society for Horticultural Science 84: 158-169.
- Leece D.R. 1976. *Composition and ultrastructure of leaf cuticles from fruit trees, relative to differential foliar absorption*. Australian Journal of Plant Physiology 3: 833-847.
- Leece D.R. 1978. *Foliar absorption in Prunus domestica L. I. Nature of development of the surface wax barrier*. Australian Journal of Plant Physiology 5: 749-766.
- Ling F. and M. Silberbush. 2002. *Response of maize to foliar vs. soil application of nitrogen-phosphorus-potassium fertilizers*. Journal of Plant Nutrition 25(11): 2333-2342.
- Macey M.J.K. 1970. *The effect of light on wax synthesis in leaves of Brassica oleracea*. Phytochemistry 9(4): 757-761.
- Malusa E. and L. Tosi. 2005. *Phosphorous acid residues in apples after foliar fertilization: results of field trials*. Food Additives and Contaminants 22(6): 541-548.
- Marschner H. 1995. *Uptake and release of mineral elements by leaves and other aerial plant*. In mineral nutrition of higher plants. 2nd edition Academic Press. pp.116-130.

Mengel K. 2002. *Alternative or complementary role of foliar supply in mineral nutrition*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 33-47.

Modaihsh A.S. 1997. *Foliar application of chelated and non-chelated metals for supplying micronutrients to wheat grown on calcareous soil*. Experimental Agriculture 33(2): 237-245.

Okuda A. and Y. Yamada. 1962. *Foliar absorption of nutrients. IV. The effect of some organic compounds on the absorption of foliar applied phosphoric acid*. Soil Science and Plant Nutrition 8: 147-149.

Ozaki L.G. 1955. *Effectiveness of foliar manganese sprays on beans and peas*. The American Society of the Horticultural Proceedings. 66: 313-316.

Raese J.T. and D.C. Staiff. 1988. *Chlorosis of "Anjou" pear trees reduced with foliar sprays of iron compounds*. Journal of Plant Nutrition 11(6-11): 1379-1385.

Rashid A. and J. Ryan. 2004. *Micronutrient constraints to crop production in soils with Mediterranean-type characteristics: a review*. Journal of Plant Nutrition 27(6): 959-975.

Reed D.W. and H.B. Tukey, JR. 1978. *Effect of pH on foliar absorption of phosphorus compounds by chrysanthemum*. Journal of the America Society Horticultural Science 103: 337-340.

Reed D.W. and H.B. Tukey, JR. 1982. *Temperature and light intensity effects on epicuticular waxes and internal cuticle ultrastructure of Brussels sprouts and carnation leaf cuticles*. Journal of the America Society Horticultural Science 107: 417-420.

Reuveni, R., M. Reuveni and V. Agapov. 1994. *Induction of growth increase and systemic resistance to Exserohilum turcicum in maize by foliar spray of phosphates*. Journal of Phytopathology 141(4): 337-346.

Ryser, J.P. 1991. *Fumure foliaire en grandes cultures*. Station fédérale de recherches agronomiques de Changins 23(6): 317-320.

Sanchez-Zamora M.A. and R. Fernández-Escobar. 2002. *The effect of foliar vs. soil application of urea to olive trees*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 675-678.

Schlegel T.K. and J. Schönherr. 2004. *Mixing calcium chloride with commercial fungicide formulations results in very slow penetration of calcium into apple fruits*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 167(3): 357-362.

Schlegel T.K. and J. Schönherr. 2002. *Selective permeability of cuticles over stomata and trichomes to calcium chloride*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 91-96.

Schönherr J. and M.J. Bukovac. 1972. *Penetration of stomata by liquids. Dependence on surface tension, wettability and stomatal morphology*. Plant Physiology 49(5): 813-819.

Schönherr, J. 2002. *Foliar nutrition using inorganic salts: laws of cuticular penetration*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 77-84.

Schönherr, J. 2001. *Cuticular penetration of calcium salts: effects of humidity, anions, and adjuvants*. Journal of Nutrition and Soil Science 164: 225-231.

Schönherr J. and R. Hüber. 1977. *Plant cuticles are polyelectrolytes with isoelectric points around three*. Plant Physiology 59(2): 145-150.

Schönherr J., Fernández V. and L. Schreiber. 2005. Rates of cuticular penetration of chelated Fe^{III}: Role of humidity, concentration, adjuvants, temperature, and type of chelate. Journal of Agricultural and Food Chemistry 53(11): 4484-4492.

Shelp B.J., Vivekanandan P., Vanderpool R.A. and A.M. Kithika. 1996. *Translocation and effectiveness of foliar-fertilized boron in broccoli plants of varying boron status*. Plant and Soil 183(2): 309-313.

Silva A.P., Rosa E. and S.H. Haneklaus. 2003. *Influence of foliar boron application on fruit set and yield of hazelnut*. Journal of Plant Nutrition 26(3): 561-569.

Starast M., Karp K. and M. Noormets. 2002. *The effect of foliar fertilization on the growth and yield of Lowbush blueberry in Estonia*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 679-684.

Stock D. and P.J. Holloway. 1993. *Possible mechanisms for surfactant-induced foliar uptake of agrochemicals*. Pesticide Science 38: 165-177.

Swietlik D. and M. Faust. 1984. *Chapter 8: Foliar Nutrition of fruit Crops*. Horticultural Reviews 6: 287-353.

Tojanko S., Ternar T. and Z. Cmelik. 2002. *Effect of foliar application and fertigation with some nutrients on fruit mineral content of young "Golden delicious" apple trees*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 185-189.

Torres M.D., Farré J.M. and J.M. Hermoso. 2002. *Foliar B, Cu and Zn applications to hass avocado trees: penetration, translocation and effects on tree growth and cropping*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 105-111.

Toscano P., Godino G., Belfiore T. and C. Bricolli-Bati. 2002. *Foliar fertilisation: a valid alternative for olive cultivar*. Acta Horticulturae (ISHS) 594: 191-195.

Tremblay N. 1991. *Fertilisation foliaire*. Journées horticoles provinciales : protection des cultures; terre noire; clinique; laitue; terre minérale. Saint-Rémi, Québec. p. 92-95.

Walworth J.L., Pond A.P. and G.J. Sower. 2006. *Fall-applied foliar zinc for pecans*. Hortscience 41(1): 275-276.

Webb D.A., Holloway P.J. and N.M. Western. 1999. *Effects of some surfactants on foliar impaction and retention of monosize water droplets*. Pesticide Science 55: 343-389.

Williams C.M.J., Maier N.A. and L. Bartlett. 2004. *Effect of Molybdenum foliar sprays on yield, berry size, seed formation, and petiolar nutrient composition of "Merlot" grapevines*. Journal of Plant Nutrition 27(11): 1891-1916.

Yamada Y., Jyung W.J., Wittwer S.H. and M.J. Bukovac. 1965a. *The effects on urea on ion penetration through isolated cuticular membranes and ion uptake by leaf cells*. Proceedings of the American Society for Horticultural Science 87: 429-432.

Yamada Y., Wittwer S.H. and M.J. Bukovac. 1965b. *Penetration of organic compounds through isolated cuticular membranes with special reference to ¹⁴C urea*. Plant Physiology 40(1): 170-175.

Yorinori M.A., Klingelfuss L.D., Paccola-Meirelles L.D. and J.T. Yorinori. 2004. *Effect of time of spraying of fungicide and foliar nutrient on soybean powdery mildew*. Journal of Phytopathology 152: 129-132.