

3. Eau, substrat et fertilisation

Introduction

Les végétaux sont constitués d'eau, dans une proportion de 85-90 %, puis de matière organique et de minéraux. La photosynthèse, qui s'effectue dans les feuilles vertes, produit des glucides et ultimement de la matière organique. L'eau et les minéraux (les éléments nutritifs) sont absorbés par les racines qui se forment dans le sol ou le substrat sans sol, et sont diffusés dans toute la plante par l'intermédiaire de tissus spécialisés (qui forment le système vasculaire des plantes) appelés xylème. Le dioxyde de carbone puisé dans l'air et l'énergie de la lumière absorbée par la chlorophylle sont les moteurs de l'activité photosynthétique. La majeure partie de l'eau qui est absorbée ($\approx 90\%$) se perd par les feuilles et s'échappe dans l'air sous l'effet de la transpiration, essentiellement en raison de la différence de pression de vapeur entre le milieu interne de la feuille et l'air ambiant. Une petite partie de l'eau sert à la photosynthèse ($\approx 1\%$) ou devient un constituant de la plante ($\approx 9\%$). Les glucides (sucres et amidons) sont produits par la photosynthèse et sont véhiculés dans la plante, généralement vers le bas, par les tissus vasculaires qu'on appelle le phloème.

Eau

L'eau est l'un des éléments les plus importants pour la croissance d'une culture, et c'est souvent celui qu'on néglige le plus. L'eau est le milieu où se produisent les processus chimiques, comme l'absorption des éléments nutritifs et la photosynthèse. Par la transpiration, l'eau agit comme élément refroidissant à la fois pour les végétaux et pour leur environnement. Les deux grands facteurs à considérer sont la quantité et la qualité d'eau dont a besoin la culture.

Absorption

L'absorption de l'eau peut être active ou passive. L'absorption active nécessite de l'énergie (à partir de la respiration des racines). Elle amène un accroissement de la concentration des éléments nutritifs dans les racines, ce qui provoque la pénétration de l'eau aspirée à l'intérieur des racines par osmose.

L'absorption passive de l'eau par les racines se déclenche sous l'effet de la transpiration des feuilles, celles-ci perdant leur eau par les orifices appelés stomates. La vapeur d'eau passe par les stomates d'un milieu où la pression de vapeur d'eau est élevée (en l'occurrence dans les feuilles) à un milieu où la pression est moins élevée (en l'occurrence à l'extérieur des feuilles). Lorsque l'humidité ambiante est très élevée, les plantes perdent moins de vapeur d'eau que lorsque le taux d'humidité est plus faible, puisque, à l'extérieur, parce que la pression de vapeur d'eau est plus élevée (ce qui réduit la différence de pression entre l'intérieur des feuilles et l'air extérieur). La perte d'eau enclenche un processus en chaîne qui fait remonter l'eau par l'intermédiaire du xylème pour remplacer, dans les feuilles, l'eau que celles-ci perdent. En réaction, les poils absorbants des racines vont absorber l'eau dans le sol suivant le même gradient. La quantité d'eau puisée par les racines dépend aussi du niveau d'humidité et de la salinité du sol. L'humidité relative de l'air ainsi que l'humidité et la concentration de sels dans le sol sont les trois facteurs qui influent sur l'absorption de l'eau.

Quantité

Les besoins en eau d'une culture peuvent varier de 0,1 à 7 L d'eau par mètre carré de serre par jour, desquels 90 % doivent être comblés pendant le jour. Cette quantité varie selon l'espèce végétale, la taille des plants, l'humidité relative, l'ensoleillement, la température ou le chauffage et le taux de ventilation. Au moment de dimensionner le système d'irrigation (conduites, pompes, buses), il est recommandé de faire reposer les calculs sur 1 L/m²/h comme débit minimal des conduites et du système d'irrigation. Les besoins annuels totaux en eau d'une serre exploitée à longueur d'année pour la production de cultures à indice foliaire élevé (comme celle de légumes) et où la solution nutritive est recyclée dépassent de 25-35 % les précipitations annuelles d'environ 75 cm que reçoit l'Ontario. Autrement dit, l'eau de pluie recueillie du toit de la serre ne suffit pas à combler les besoins annuels d'une culture. Les besoins en eau sont à leur maximum pendant l'été. Les exploitations serricoles qui, en une seule journée, peuvent prélever 50 000 L d'eau ou plus des sources d'eau de surface ou d'eaux

souterraines doivent se conformer aux règlements du ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique quant à l'utilisation de l'eau en demandant un permis de prélèvement d'eau.

Permis de prélèvement d'eau

www.ontario.ca/fr/environnement-et-energie/permis-de-prelevement-deau-0

Programme de réglementation des prélèvements d'eau

Les prélèvements d'eau en Ontario sont assujettis à la *Loi sur les ressources en eau de l'Ontario* (LREO) et au Règlement sur le prélèvement et le transfert d'eau (Règl. de l'Ont. 387/04).

L'article 34 de la LREO dispose que quiconque prélève plus de 50 000 L d'eau par jour d'un lac, d'un ruisseau, d'une rivière ou d'une source d'eau souterraine (y compris d'un étang alimenté par une source), doit obtenir un permis de prélèvement d'eau du ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique (MEACC). Les titulaires de permis sont tenus de consigner la quantité d'eau prélevée chaque jour et de faire parvenir ces données annuellement au MEACC.

La conservation de l'eau est un aspect important du Programme de réglementation des prélèvements d'eau du MEACC.

Les mesures de conservation de l'eau proposées ou prises doivent être documentées au moment de la demande de permis.

Gestion de l'utilisation de l'eau

L'utilisation efficace de la ressource qu'est l'eau devrait être au cœur des préoccupations des sericulteurs. Les réseaux fermés ou de recirculation des éléments nutritifs sont intrinsèquement les plus efficaces, mais ils ne conviennent pas à tous les systèmes cultureux ou ne sont pas rentables dans toutes les situations. Les producteurs qui utilisent des réseaux ouverts ont le choix d'un certain nombre de façons de procéder. Ils peuvent par exemple adopter un système qui utilise des goutteurs à faible débit pour les cultures florales en pot et un système d'irrigation goutte-à-goutte au moyen de tuyaux perforés pour la culture sur sol de fleurs

coupées; ils réduisent ainsi à peu de frais les quantités d'eau et de fertilisants utilisées et atténuent le lessivage des éléments nutritifs hors de la zone racinaire. Ils peuvent aussi réduire la consommation d'eau et de fertilisants en intégrant mieux les conditions du milieu de croissance (lumière, température et humidité) en fonction de la culture et de son état de développement.

Il est bon de surveiller la composition de l'eau de percolation qui se retrouve dans l'étang d'irrigation, le marécage artificiel ou la bande filtrante de végétation avant de l'évacuer dans l'environnement. Des règlements sont en place tant au palier fédéral qu'au palier provincial (article 53 de la LREO) pour protéger les cours d'eau et les organismes aquatiques des effluents dangereux. Le ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique publie des fiches d'information sur la gestion des eaux usées des serres et la gestion des eaux pluviales. On trouve ces fiches en ligne à www.ontario.ca/fr/environnement-et-energie/regles-visant-les-producteurs-serricoles.

Qualité

Outre que l'approvisionnement en eau doit être abondant et fiable, la qualité de l'eau doit respecter certains critères, les plus importants étant :

- la concentration des particules en suspension, qui peuvent encrasser le matériel d'irrigation ou laisser des résidus sur les feuilles si la culture est irriguée par aspersion;
- la quantité des composés ou éléments chimiques dissous (anions et cations), qui peuvent influencer la croissance et la nutrition des plantes.

C'est le deuxième de ces critères (la quantité de composés chimiques ou ions dissous) qui cause le plus de soucis aux producteurs. Les critères applicables à la qualité de l'eau dépendent de plusieurs facteurs :

- Le système de culture ou d'irrigation utilisé : système d'irrigation aérien en circuit ouvert avec goutteurs à faible débit, rampes de pulvérisation ou arrosage manuel; système d'irrigation aérien en circuit fermé (à recirculation) (avec substrat sans sol); système fermé de sub-irrigation (culture en pots ou en contenants de plantes à fleurs); ou technique de culture sur film nutritif (culture sans sol de légumes dont les racines sont constamment baignées dans une solution nutritive).

- Qualité de l'eau. Les normes sont plus strictes dans le cas des systèmes fermés (à recirculation), car certains ions, comme les ions sodium, chlorures et sulfates, dont les plantes n'ont besoin pour leur croissance qu'en très petites quantités, finissent par s'accumuler dans la solution, ce qui nuit à l'absorption des ions nutritifs indispensables à la croissance des plantes et augmente la fréquence à laquelle il faut rafraîchir les solutions nutritives en recirculation. La recirculation de l'eau d'irrigation amène une augmentation des risques de propagation des maladies racinaires, mais des technologies de traitement (rayonnement ultraviolet, ozonation ou chaleur), permettent, au besoin, d'assainir les solutions nutritives en recirculation.
- Le drainage du substrat doit permettre d'évacuer la grande quantité d'eau nécessaire à d'éventuels lessivages du substrat ou du sol.
- Les cultures et leurs besoins particuliers ou leur sensibilité particulière à certains éléments comme le bore, le fluorure, le zinc, etc. La formation de biofilms est un problème fréquent (en partie à cause de l'utilisation de plus en plus répandue d'eau d'irrigation non chlorée); les biofilms bouchent les conduites goutte-à-goutte de petit diamètre et les goutteurs à faible débit et à compensation de pression, ce qui nuit à la régularité de l'écoulement. Les produits à base de peroxyde d'hydrogène, les UV ou l'ozone permettent de prévenir la formation d'un biofilm dans les systèmes d'irrigation.

Dans une serre avec irrigation aérienne (par aspersion) sans recirculation, une simple analyse de l'eau, effectuée chaque saison ou quand on change de source d'eau, suffit à en déterminer la qualité. Cette analyse doit mesurer la conductivité électrique (CÉ) et titrer les ions hydrogène (pH), le sodium (Na^+), les chlorures (Cl^-) et les sulfates (SO_4^{2-}). Dans le cas des systèmes de sub-irrigation ou à recirculation, faire faire une analyse complète de l'eau avec titrage des bicarbonates (HCO_3^-) et des oligo-éléments comme le fer (Fe^{2+} , Fe^{3+}), le bore (B), le zinc (Zn^{2+}), le manganèse (Mn^{2+}) et le cuivre (Cu^{2+}).

Conductivité électrique (CÉ)

La conductivité électrique (CÉ) est la mesure de la concentration totale d'ions (charge ionique totale des cations et des anions) dans une solution. La charge ionique totale (souvent appelée aussi salinité

totale ou teneur en sels solubles) se mesure à l'aide d'un conductimètre. À une charge ionique élevée correspond une CÉ élevée. La CÉ d'une solution est mesurée au moyen de deux électrodes de 1 cm^2 chacune, éloignées de 1 cm. Elle est exprimée en millisiemens/centimètre (mS/cm ou dS/m) ou, selon l'ancienne terminologie, en millimhos/centimètre (mmho/cm) ou micromhos/centimètre ($\mu\text{mhos/cm}$) à $25 \text{ }^\circ\text{C}$, température de référence. De nos jours, la plupart des conductimètres font les corrections nécessaires pour la température de manière à tenir compte de l'influence de celle-ci sur la lecture de la CÉ. La teneur en sels solubles s'exprime également par la concentration ionique en équivalent-poids par litre (eq/L ou meq/L), des unités qui représentent la charge constituée par tous les ions présents dans la solution. Les valeurs de meq/L des anions et des cations dans la solution, telles qu'elles sont indiquées par l'analyse de laboratoire doivent être égales.

Pour convertir les meq/L en mS/cm et inversement* :

- $1 \text{ meq/L} \approx 0,055 \text{ mS/cm} \approx 55 \mu\text{S/cm}$
- $1 \text{ mS/cm} \approx 1\,000 \mu\text{S/cm} \approx 18,2 \text{ meq/L}$

* Le m signifie milli (0,001 ou 1 millième) et le μ , micro (0,000001 ou 1 millionième).

À noter qu'un conductimètre ne mesure pas la concentration des différents ions, mais la somme de toutes les charges ioniques. Plus la valeur de CÉ est élevée, plus la concentration d'ions dans la solution l'est également, ce qui rend plus difficile l'absorption par les plantes de l'eau contenue dans la solution, à cause de la succion osmotique accrue. Le conductimètre doit être étalonné périodiquement avec une solution-étalon ayant une valeur de CÉ connue. Par exemple, une solution titrant 0,01 M (mole) de chlorure de potassium (KCl), obtenue par dissolution de 0,74 g de KCl dans 1 L d'eau, possède une CÉ de 1,4 mS/cm à $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Au bout de plusieurs utilisations, le conductimètre affiche des lectures sous-estimées à cause de l'oxydation de ses électrodes. Nettoyer ces dernières en les plaçant dans une solution acide (pH de 1,0-2,0) pendant toute une nuit. Si l'appareil n'a pas été corrigé à $25 \text{ }^\circ\text{C}$, augmenter les valeurs obtenues de 2 % pour chaque $1 \text{ }^\circ\text{C}$ de moins que $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Le tableau 3-1, *Classement de la qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique (CÉ) et de certains critères*, p. 28, donne un classement général de la qualité de l'eau. Il est à noter qu'un échantillon d'eau

ne peut être classé dans une catégorie donnée que s'il satisfait à tous les critères de la catégorie. Il est important de connaître le classement attribué à une source d'eau, car celui-ci a une influence sur la culture pratiquée et la technologie d'irrigation utilisée.

Tableau 3-1. Classement de la qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique (CÉ) et de certains critères

Cat.	CÉ (mS/cm)	Sodium (Na ⁺) (ppm)	Chlorures (Cl ⁻) (ppm)	Sulfates (SO ₄ ²⁻) (ppm)
1	< 0,5	< 30	< 50	< 100
2	0,5-1,0	30-60	50-100	100-200
3	1,0-1,5	60-90	100-150	200-300

Source : L'information présentée dans ce tableau se fonde sur des données historiques a été colligée sur de nombreuses années par les spécialistes de la serriculture du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAARO).

Une eau de catégorie 1 convient à toutes les formes d'irrigation et à tous les systèmes d'irrigation. La plupart du temps, l'eau provenant des Grands Lacs entre dans cette catégorie, tout comme l'eau de pluie recueillie dans des citernes du toit des serres. L'eau de catégorie 2 ne convient qu'à des cultures sur substrat ou sol qui peut être convenablement lessivé. Si elle sert à des systèmes d'irrigation aérienne à recirculation, il faudra rafraîchir la solution nutritive plus souvent en veillant à ce que l'élimination de la vieille solution ne nuise pas à l'environnement.

L'eau de catégorie 2 ne convient pas aux plantes cultivées sur film nutritif ni aux plantes sensibles aux sels cultivées dans les systèmes avec sub-irrigation (irrigation souterraine), notamment si l'un des ions énumérés, le sodium, le chlore ou les sulfates se trouve à l'intérieur de la marge de valeurs indiquée. Du point de vue de la chimie des solutions aqueuses, il est très rare que l'on trouve par exemple de fortes concentrations de sodium et de faibles concentrations de chlore en Ontario parce que la source de sodium et de chlore est généralement liée à la solubilisation du chlorure de sodium. Une source d'eau pourrait encore être classée dans la catégorie 2 même si les concentrations de sodium, de chlorure et de sulfates se trouvent dans la fourchette de catégorie 1 parce que

les autres anions et cations ajoutent à la conductivité électrique de l'eau de la même façon que les ions de sodium, de chlorure et de sulfate. En Ontario, les sources d'eau de surface et de puits ont souvent une forte teneur en calcium, en magnésium et en bicarbonate qui ajoutent à la conductivité électrique. Les fortes teneurs en calcium et en magnésium ne nuisent pas nécessairement à la croissance des plantes parce qu'ils constituent des éléments nutritifs essentiels. Cependant ils posent des problèmes en ce qui concerne les dispositifs tels que les goutteurs à faible débit parce que ces ions forment un précipité d'oxydes et de carbonates à l'intérieur qui les bouchent et rendent irrégulière l'irrigation de chaque plant.

L'eau de catégorie 3 n'est pas recommandée pour les espèces sensibles aux sels (comme la primevère, la violette africaine, le gloxinia), ni aux cultures dont on limite le développement racinaire ou dont la solution nutritive est recyclée. Si la teneur en sels dépasse 1,5 mS/cm, l'eau est de qualité limite pour les cultures en serre quelles qu'elles soient. Dans certains cas, les plantes réussiront à pousser, mais leur rendement sera médiocre. Comparativement aux chlorures (Cl⁻), le seuil de concentration toxique du sodium (Na⁺) est bas, parce que le sodium a tendance à être absorbé par les particules de sol ou d'humus et à s'accumuler ainsi dans le sol ou le substrat. Cette concentration de sodium peut entraver l'absorption du potassium, du calcium et du magnésium. Les chlorures ont moins tendance à s'accumuler dans le sol ou le substrat en raison de leur charge négative. Certaines cultures (p. ex., les dracaenas, les concombres, les azalées et les lis) sont extrêmement sensibles aux chlorures. Dans l'eau des puits de la plupart des régions de l'Ontario, les concentrations de sodium sont faibles, tandis que les concentrations de sulfates peuvent être relativement élevées à cause de la présence de gypse dans les nappes aquifères. La plupart des cultures n'ont pas besoin de plus de 100 ppm de sulfates (33 ppm de soufre élémentaire) pour répondre à leurs besoins en soufre.

Pourquoi mesurer la CÉ des substrats ou des solutions

La CÉ ne révèle rien des éléments nutritifs qui sont présents ni de leur quantité, mais elle donne une idée globale de la valeur nutritive de la solution. Une CÉ élevée indique que la solution est riche en ions dissous, et que l'eau sera plus difficilement absorbable par les racines des plantes. Si la CÉ est excessive, les

racines peuvent se déshydrater, se détériorer et mourir, surtout l'été quand la demande d'eau est forte en raison de taux de transpiration élevés. Cette situation se produit généralement lorsque le sol ou le substrat n'est pas suffisamment lessivé, que les plants sont surfertilisés ou que l'eau d'irrigation est de mauvaise qualité (CÉ élevée). Le feuillage peut être vert foncé et sous-développé et les plants peuvent se flétrir pendant les heures les plus chaudes ou les plus ensoleillées de la journée même si le substrat est passablement humide. Plus grave encore, les racines peuvent brunir et comporter très peu de nouvelles racines blanches actives, sinon aucune.

Une CÉ faible indique une solution pauvre en ions dissous, et donc une absorption de l'eau plus facile pour les racines. Les plants sont habituellement luxuriants, possèdent de grosses feuilles et peuvent en fait même être légèrement sous-fertilisés étant donné qu'il n'y a pas autant d'éléments nutritifs biodisponibles. Toutefois, la croissance des racines sera favorisée. Une faible CÉ pendant une période prolongée induit souvent une carence en un des macro-éléments (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et soufre) nécessaires à la croissance des végétaux.

Comment mesurer la CÉ d'un substrat

Il est important de faire preuve de constance dans le choix de la méthode utilisée pour déterminer la CÉ d'un échantillon de substrat, car les résultats varient légèrement de l'une à l'autre. Voici les quatre principales méthodes utilisées :

- la méthode de l'extrait de substrat saturé;
- la méthode Spurway de l'extrait de substrat dilué (1 partie de substrat pour 2 parties d'eau en volume);
- la méthode de l'eau de percolation (« pour-through »);
- la méthode du pressage.

La méthode de l'extrait de substrat saturé et la méthode Spurway consistent à ajouter de l'eau à un échantillon de substrat prélevé dans la zone racinaire, puis à en extraire l'eau et à mesurer la CÉ de la solution obtenue. Avec la première de ces méthodes, le substrat est entièrement saturé d'eau, tandis qu'avec la deuxième, il est seulement dilué à raison d'un volume d'eau pour deux volumes de substrat. Ce sont les techniques le plus couramment employées dans

les laboratoires d'analyse. En Amérique du Nord, la méthode de l'extrait de substrat saturé est le plus couramment utilisée par les laboratoires universitaires et privés pour l'analyse des substrats utilisés dans les serres. Elle donne une valeur de CÉ qui est habituellement environ deux fois et demie plus élevée que celle qui est obtenue avec la méthode Spurway.

La méthode de l'eau de percolation consiste à mouiller le substrat en versant de l'eau distillée ou déionisée par le haut du pot et à recueillir les 50 premiers millilitres de la solution qui s'en écoule (eau de percolation) pour en mesurer la CÉ et le pH. Cette méthode est rapide et très utile pour une surveillance maison effectuée sur place, à condition cependant de verser l'eau uniformément et sur toute la surface du substrat. Elle risque aussi de surestimer les valeurs de la CÉ lorsque les pots sont vieux (surtout s'ils sont irrigués par le bas), parce que les sels s'accumulent dans la partie supérieure du substrat, alors que les valeurs de la CÉ peuvent en fait être plus faibles dans la zone racinaire. Pour que cette méthode soit fiable, il faut s'assurer de bien mouiller le substrat.

Une autre méthode de surveillance maison, le pressage, consiste à retirer les plants du pot et à presser la moitié inférieure de la motte entourant la racine pour en extraire la solution nutritive. On obtient ainsi un liquide assez représentatif de la solution de sol qui baigne les racines en croissance. Cette méthode est très utilisée pour surveiller la CÉ des substrats dans les plateaux de semis alvéolés. Étant donné le petit volume de solution extrait, la méthode du pressage oblige à utiliser un conductimètre permettant de lire la CÉ dans seulement 1-2 gouttes de liquide. On doit mouiller passablement le substrat pour être en mesure d'en extraire une solution.

Interprétation des mesures de la CÉ

Les besoins nutritifs d'une culture varient suivant son stade phénologique (stade de développement). On distingue essentiellement trois stades. Au cours du premier, qui correspond à la germination et à l'enracinement des boutures, les besoins sont faibles. Au stade suivant, au plus fort de la croissance végétative, les besoins sont élevés. Enfin, au troisième stade, quand les plants parviennent à maturité, les besoins diminuent. En règle générale, les plants se conserveront mieux dans le commerce si, vers la fin de leur séjour en serre, on abaisse les niveaux d'éléments

nutritifs (et si l'on réactive le système racinaire); c'est le cas notamment du chrysanthème, de l'hortensia et du poinsettia. Par contre, certaines cultures, comme le lis de Pâques, se conservent mieux si elles sont fertilisées jusqu'à leur sortie de la serre. Le tableau 3-2, *Niveaux relatifs de CÉ nécessaires aux cultures de serre en croissance active, déterminés à partir de l'eau de percolation et de l'extrait saturé*, ci-contre, indique les niveaux de CÉ conseillés à chaque phase de croissance active de différentes cultures en pot, à partir de deux méthodes d'échantillonnage. Au cours des première et dernière phases de croissance, la CÉ doit être abaissée d'environ 1,0 mS/cm. On prélève chaque semaine des échantillons dans cinq pots par zone représentative, on fait la moyenne et on note le résultat.

- Si la CÉ est trop basse, l'élever par un apport accru d'engrais.
- Si la CÉ est trop élevée, l'abaisser par dilution en lessivant le sol avec de l'eau claire. Si la culture est irriguée par le dessus, ajouter une solution à faible CÉ par le haut. Appliquer suffisamment d'eau pour saturer le substrat, afin d'accroître la solubilité des sels excédentaires. Attendre 1-2 heures et employer suffisamment d'eau fraîche pour faire descendre la solution ayant une CÉ élevée et la faire sortir du pot. Une forme de lessivage peut aussi être utile dans les systèmes avec sub-irrigation, mais au lieu de chasser les sels hors du substrat, ceux-ci sont forcés à remonter dans la partie supérieure du substrat, laquelle est exempte d'activité racinaire. Il est important de vérifier si les teneurs élevées en sels se situent dans la zone des racines ou uniquement dans la partie supérieure du substrat (phénomène normal en culture avec sub-irrigation, qui n'a aucune incidence sur les racines). Si la CÉ est élevée dans la zone racinaire, on peut injecter une solution nutritive à faible CÉ ou de l'eau claire dans le réseau de sub-irrigation; elle fera remonter les sels dans le sol ou les diluera, ce qui facilitera leur absorption par les racines. Les cultures produites par faible luminosité en automne et en hiver ont besoin d'une eau ayant une CÉ plus élevée que celles cultivées en été; en effet, en automne et en hiver, les plantes transpirent moins et absorbent donc moins d'eau (et d'engrais). En été, il faut compenser l'augmentation de la transpiration et des quantités d'eau absorbées en abaissant la CÉ de la solution nutritive (solution d'engrais) qu'on applique à la culture. En été, la CÉ de la solution nutritive injectée dans le réseau de sub-irrigation doit être inférieur de 30 à 40 % à ce qu'elle est en hiver.

Tableau 3-2. Niveaux relatifs de CÉ nécessaires aux cultures de serre en croissance active, déterminés à partir de l'eau de percolation et de l'extrait saturé

Besoins en éléments nutritifs	Extrait de substrat saturé (mS/cm)	Eau de percolation (mS/cm)	Cultures
Faibles	0,75-2,0	1,0-2,6	Azalée, bégonia, calcéolaire, calla, cinéraire, cyclamen, gerbera, gloxinia, impatiante, orchidée, primevère, <i>Streptocarpus</i> spp., violette africaine
Moyens	1,5-3,0	2,0-3,5	Cactus de Noël (<i>Schlumbergera</i>), calibrachoa, plantes du genre <i>Clerodendrum</i> , dahlia, exacum, pélagonium à feuilles zonées, hibiscus, kalanchoe, rosier
Élevés	2,0-3,5	2,6-4,6	Chrysanthème, géranium, lis, poinsettia

Source : L'information présentée dans ce tableau a été colligée au fil du temps par les spécialistes de la serriculture du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO).

Le pH et son rôle

Le pH est une mesure inverse (ou logarithme négatif) de la concentration des ions hydrogène (H^+) dans une solution. En grande quantité, les ions H^+ donnent un pH faible, tandis qu'en faible quantité, ils donnent un pH élevé. L'échelle du pH s'étend de 1 à 14. Un pH inférieur à (<) 7,0 est acide et un pH supérieur à (>) 7,0 est basique (ou alcalin), 7,0 correspondant à un pH neutre. Plus le pH est élevé, plus la solution est basique, et plus il est bas, plus elle est acide. Chaque unité de l'échelle de pH représente un facteur de variation de 10 dans la concentration des ions H^+ .

Alcalinité et bicarbonate

L'alcalinité exprime la concentration d'un certain nombre d'ions et leur capacité à neutraliser les acides ou les ions hydrogène dans l'eau. Il y a un rapport entre le pH et l'alcalinité, puisque celle-ci détermine le pouvoir tampon de l'eau en présence d'acide; l'alcalinité définit la résistance de l'eau à un changement de pH. Le plus souvent en Ontario, l'ion qui influence le plus l'alcalinité est l'ion bicarbonate. En Ontario, il n'est pas rare que l'eau compte plus

de 200 ppm de bicarbonates, qui proviennent de son passage à travers une couche calcaire du sous-sol (carbonates de calcium et de magnésium). Dans ce cas, la forte concentration de bicarbonates neutralise les ions hydrogène, ce qui fait baisser la concentration d'ions H^+ , et par conséquent élève le pH. Bien qu'il existe une corrélation générale entre le pH et la teneur en bicarbonates, il est important de savoir que ce lien n'est pas spécifique. Par conséquent, on doit connaître la concentration de bicarbonates dans la source d'approvisionnement en eau si l'on veut pouvoir calculer la quantité d'acide nécessaire pour neutraliser ou abaisser le pH.

Partout en Amérique du Nord et en Europe, les laboratoires offrant des services d'analyse aux serriculteurs déclarent souvent l'alcalinité de différentes façons. Les laboratoires de l'Ontario expriment la concentration en parties par millions (ppm) de bicarbonates présents dans l'eau, tandis que d'autres l'expriment, le plus souvent, en mg de $CaCO_3/L$ ou en milléquivalents (meq) d'alcalinité. Voici le rapport entre ces unités :

- 61 ppm de bicarbonates = 50 ppm d'alcalinité = 1 meq d'alcalinité

En quoi la teneur en bicarbonates ou l'alcalinité modifie-t-elle le pH du substrat?

Quand la concentration de bicarbonates ou l'alcalinité est élevée, le pH du substrat augmente rapidement quand de l'eau est appliquée par irrigation de surface ou par sub-irrigation sans possibilité de lessivage. En général, plus le volume du substrat est faible dans le contenant (p. ex. plateaux à alvéoles), plus l'élévation du pH est rapide. C'est que la teneur en bicarbonates habituelle de l'eau des puits ou des eaux de surface de l'Ontario possède un pouvoir tampon supérieur à l'acidité ou l'alcalinité des engrais utilisés pour fertiliser les cultures. L'élévation du pH se trouve aussi augmentée selon la composition de l'engrais utilisé.

Comment mesurer le pH

On mesure le pH d'une solution selon quatre méthodes principales :

- Le papier de tournesol, la méthode la moins coûteuse (mais également la moins précise), qui consiste à tremper le papier dans la solution et à en comparer la couleur à des codes de couleur correspondants à différentes fourchettes de pH.
- Le pH-mètre de poche, en forme de stylo, de coût raisonnable, relativement précis et facile à transporter sur soi dans la serre. Il suffit de tremper la sonde dans la solution fertilisante et de noter la valeur de pH qui s'affiche sur l'écran numérique. Cependant, en serre, il a une durée de vie est beaucoup moins longue que les modèles plus solides et plus chers, et sa sonde ne peut être remplacée.
- Les pH-mètres à électrodes, appareils les plus précis, et les plus coûteux, qui demandent le plus d'entretien. Ils donnent une mesure rapide du pH. On plonge la sonde à pH directement dans la solution et on l'y laisse jusqu'à ce que la lecture se stabilise. La plupart des pH-mètres haut de gamme effectuent une correction pour la température, bien que celle-ci n'ait qu'une faible incidence (entre 0,1 et 0,3 unité) aux fourchettes de températures de l'eau d'irrigation utilisées par la plupart des producteurs. On doit rincer la sonde après chaque échantillonnage. L'étalonnage est très important. Les sondes à pH ne sont pas aussi stables que les sondes à CÉ. Les régler au moins toutes les semaines à l'aide de solutions-étalons correspondant à des pH de 4,0 et de 7,0. Garder les sondes à pH propres, les entreposer dans un liquide et les remplacer plus souvent que les sondes à CÉ.
- On installe maintenant des pH-mètres à électrodes en ligne qui font partie de systèmes informatisés de dosage des engrais et de l'acide, afin d'assurer une surveillance et une correction constantes du pH. On installe deux appareils en parallèle avec les systèmes de dosage informatisés pour détecter les changements de précision. Pour garantir la stabilité et la précision des lectures de pH, la solution doit avoir été agitée pendant suffisamment longtemps.

Vérifier le pH du substrat par la méthode de l'eau de percolation à partir de l'extrait aqueux ou boueux ou de la solution ayant servi à mesurer la CÉ. Utiliser de l'eau distillée, car de nombreuses sources d'eau contiennent des composés (p. ex., des bicarbonates) qui ont un pouvoir tampon susceptible de modifier le pH.

Pourquoi mesurer le pH

Quoique les ions hydrogène ne soient pas à proprement parler des éléments nutritifs, le pH influe sur la solubilité et par conséquent sur la biodisponibilité de nombreux autres éléments nutritifs (particulièrement les oligo-éléments). Par exemple, dans les substrats

sans sol, la plupart des ions positifs (cations) comme le fer, le manganèse et le calcium ainsi que les ions phosphates sont plus solubles à des pH plus faibles (et par conséquent plus facilement assimilables par les végétaux) lorsque le pH est plus bas. Inversement, à des pH plus élevés, ces ions se fixent sous des formes non assimilables. Le molybdène pour sa part est plus facilement assimilable à un pH plus élevé. Le pH influence aussi directement la colonisation du sol par certains organismes pathogènes qui risquent de nuire aux végétaux.

Chaque culture a, à l'égard du pH, une sensibilité spécifique qui procède de sa sensibilité à l'excès ou au manque de certains oligo-éléments. Par exemple, un pH < 5,5 peut entraîner une accumulation phytotoxique d'éléments nutritifs comme le manganèse et le fer chez le tagète, le géranium et le zygocactus. Chez d'autres espèces, comme l'azalée et l'hortensia, un pH bas est nécessaire pour assurer l'absorption maximale de fer et d'aluminium, des éléments indispensables à la bonne coloration des feuilles et à celle des fleurs si l'on cherche à obtenir des fleurs bleues. Un pH de 5,8-6,5 est considéré optimal pour la plupart des espèces cultivées dans des mélanges sans sol constitués de matière organique à plus de 50 %. Le tableau 3-3, *Fourchettes de pH optimales pour différentes cultures*, ci-dessous, indique les cultures qui requièrent des fourchettes de pH optimales très précises.

Tableau 3-3. Fourchettes de pH optimales pour différentes cultures

Culture	Fourchette optimale
Tagète, géranium, célosie, lis de Pâques	6,0-6,6 (± 0,2)
Pensée et violette, pétunia, muflier, pervenche, sauge, hortensia bleu, calibrachoa, pétunia, bacopa	5,4-5,8
Azalée	4,8-5,4

Source : L'information présentée dans ce tableau a été colligée au fil du temps par les spécialistes de la serriculture du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO).

Autres facteurs dont il faut tenir compte :

- Un pH légèrement plus élevé et une fertilisation avec des engrais à potentiel basique sont souhaitables pour les cultures sensibles à un pH faible, comme le géranium et le tagète.
- Le pétunia, le calibrachoa, le bacopa et le scaevola étant sujets à des carences en fer, le substrat devrait avoir un pH inférieur à 5,8. Ces cultures donnent de meilleurs résultats lorsqu'elles sont fertilisées avec des engrais à potentiel acide. Si un pH élevé est toujours un problème, envisager des applications constantes de fer EDDHA. Consulter un spécialiste de la floriculture de serre pour connaître les doses.
- Les cultures comme le chrysanthème en pot, qui ont tendance au bout d'un certain temps à élever le pH, doivent avoir un pH bas au début de leur culture.
- Le stade phénologique (âge) de la culture est important. À la floraison, le pH n'est souvent pas aussi important qu'il l'est au début de la croissance.
- Les engrais utilisés agissent aussi sur le pH de la solution nutritive et du substrat. Il est important de savoir si l'engrais complet utilisé est acidifiant ou alcalinisant. L'acidité potentielle d'un engrais est indiquée sur l'emballage par le nombre de kilogrammes de chaux calcique par tonne d'engrais. Si l'engrais a une action alcalinisante, l'étiquette en indique l'alcalinité potentielle en équivalent de kilogrammes de calcium ajouté au substrat par tonne d'engrais.

Étant donné la teneur en bicarbonates de la plupart des eaux de puits et de surface de l'Ontario, la plupart des producteurs corrigent maintenant le pH de l'eau d'irrigation à l'aide d'acide phosphorique, nitrique ou sulfurique, ou par une combinaison de ceux-ci, de manière à maintenir le pH du substrat à tout au plus 6,2. Étant donné que bien des producteurs récoltent l'eau de pluie, ils maîtriseront mieux le pH des solutions fertilisantes en mélangeant cette eau avec l'eau de surface.

Pour les producteurs, il est souvent difficile de corriger le pH de l'eau d'irrigation avec de l'eau de pluie seule parce que celle-ci n'a absolument aucun pouvoir tampon; par conséquent il est souvent préférable de mélanger de l'eau de pluie et de l'eau de surface.

Correction du pH

Eau d'irrigation

Pour bien des petits producteurs, la meilleure façon de procéder est d'injecter l'acide à l'aide d'injecteurs d'engrais. Ils doivent cependant s'assurer que l'injecteur est conçu pour les acides. D'autres producteurs préfèrent installer des sondes à pH en ligne (dans le réseau d'irrigation) qui commandent un doseur à acide. Les deux méthodes donnent de bons résultats. Le tableau 3-4, *Volume d'acide nécessaire pour neutraliser 61 ppm de HCO₃⁻ (1 mmol/L ou 1 meq/L) par 100 000 L d'eau*, ci-dessous, indique les doses d'acide nécessaires.

Il est recommandé de laisser environ 60 ppm de bicarbonates dans l'eau d'irrigation, pour faire tampon et pour parer à d'éventuelles erreurs légères dans les calculs relatifs à la composition de l'eau ou dans les dosages. Par conséquent, si le niveau initial de bicarbonates est de 240 ppm, il faudrait neutraliser environ 180 ppm, et donc multiplier par trois la quantité d'acide indiquée dans le tableau 3-4.

Pour chaque mmol de bicarbonates/L ou meq/L qui est neutralisée par un acide, on doit ajouter à la solution :

- 14 ppm d'azote (sous forme de nitrate), si l'on utilise l'acide nitrique;
- 31 ppm de phosphore (soit 71 ppm P²O⁵), si l'on utilise l'acide phosphorique;
- 16 ppm de soufre (soit 48 ppm de sulfates), si l'on utilise l'acide sulfurique.

Tableau 3-4. Volume d'acide nécessaire pour neutraliser 61 ppm de HCO₃⁻ (1 mmol/L ou 1 meq/L) par 100 000 L d'eau

Acide	Densité relative (kg/L)	Volume d'acide (L)
Phosphorique (85 %)	1,7	6,8
Nitrique (67 %)	1,5	6,6
Sulfurique (93 %)	1,8	2,8

Substrats

Si le pH est trop bas, appliquer une ou plusieurs des mesures suivantes, en gardant à l'esprit qu'il est difficile de faire augmenter le pH.

Mélanges sans sol

- Cesser d'acidifier l'eau d'irrigation.
- Fertiliser avec un engrais à action alcalinisante (riche en azote des nitrates).
- Utiliser une solution-mère de bicarbonate de potassium (100-200 kg/1 000 L), qui sera diluée à 1:100. La solution-fille doit avoir une CÉ d'environ 1,5-2,0 mS/cm.
- Si l'on utilise de la chaux, la quantité à ajouter dépend du type d'ingrédients du substrat et de leurs proportions. La mousse de sphaigne (pH de 3,5-4,5) et l'écorce (pH de 4,0) sont acides. La quantité de chaux nécessaire pour neutraliser la mousse de sphaigne et la faire passer d'un pH de 3,5 à 5,5 est d'environ 6-7 kg par m³ de mousse de sphaigne non tassée. Les mélanges sans sol comportent souvent des matériaux alcalins de type argile cuite, notamment le Haydite et le Crackpot, ou du sable. On diminue normalement la quantité de chaux quand on utilise des additifs argileux à pH élevé. On doit vérifier le pH après la préparation du substrat, mais avant les semis ou repiquages. Le pH d'un substrat humide fraîchement préparé continuera de s'élever pendant une dizaine de jours.

Sol

- Pour élever le pH de 1 point, utiliser 4,8 kg de chaux dolomitique extra-fine par 100 m².
- Pour un sol riche en argile ou en matière organique, augmenter d'environ 25 % la quantité recommandée.
- De 2 à 3 semaines après le chaulage, vérifier le pH du sol pour voir s'il est au niveau souhaité. Plus la chaux est fine, plus elle réagit rapidement avec le sol.
- La vitesse d'élévation du pH est aussi influencée par la température, l'humidité et l'aération du sol. L'élévation est plus rapide dans les sols ou substrats sans sol qui sont chauds, humides et bien aérés.
- L'utilisation de chaux hydratée dans les serres comporte certains inconvénients graves, car la chaux réagit très activement et très rapidement. Comme il est difficile de bien répartir cette chaux dans le sol, son utilisation est très limitée. On s'en sert quand même souvent pour répondre en partie aux besoins en chaux des substrats sans sol afin que le pH puisse être modifié rapidement et que le substrat puisse servir à la culture.

Si le pH du sol ou du substrat est trop élevé, on peut l'abaisser, mais ce n'est pas simple. Une ou plusieurs des méthodes suivantes peuvent y contribuer :

- Augmenter l'acidité de l'eau d'irrigation. Habituellement, il n'y a pas de danger à abaisser le pH de la solution nutritive à 5,2 ou 5,4, en y maintenant une concentration de 30-60 ppm de bicarbonates (voir plus haut). L'objectif est d'offrir aux racines une solution acide qui favorisera l'absorption des oligo-éléments jusqu'à ce que le pouvoir tampon de la solution fertilisante élève le pH.
- Cesser si possible d'utiliser des engrais à réaction alcalinisante, comme le nitrate de calcium.
- Utiliser davantage d'engrais à base d'ammonium, surtout durant les mois où la lumière du jour est abondante.
- Arroser abondamment le sol à l'aide d'une solution contenant 5 kg de sulfate de fer/1 000 L d'eau. Ne pas oublier de rincer légèrement le feuillage immédiatement après ce traitement pour éviter qu'il ne brûle.
- Utiliser du soufre à raison de 15 kg de soufre élémentaire par 1 000 L d'eau. Ce traitement met de 3 à 4 semaines à faire effet.

Voir aussi le tableau 3-5, *Correction du pH du sol*.

Tableau 3-5. Correction du pH du sol

Matériau	kg/100 m ² pour abaisser le pH de 0,5 à 1 unité*	Vitesse d'abaissement du pH
Soufre microfin	2,5	Lente
Sulfate d'aluminium	15	Rapide
Sulfate de fer	15	Moyenne

* Doses pour sols légers à moyens. Pour les sols plus lourds ou contenant davantage de matière organique, augmenter la dose d'un tiers. Les doses par m³ de terreau d'empotage correspondent à la moitié des doses recommandées ci-dessus.

Substrats artificiels (mélanges sans sol)

En serriculture commerciale, les mélanges d'empotage sans sol ont remplacé ceux qui étaient à base de terre ou de terreau. Qu'ils soient destinés à la croissance, à la multiplication, à la culture en contenants, à la culture sur banquettes ou même à la production de fleurs coupées, les substrats contiennent de moins en moins de terre proprement dite et de plus en plus d'ingrédients de remplacement dans des substrats artificiels. Les mélanges artificiels sont vendus soit prêts à l'emploi en sacs, en balles ou en vrac, soit sous forme d'ingrédients à mélanger.

Pourquoi utiliser des mélanges sans sol

Voici les avantages que présentent les mélanges sans sol par rapport aux terreaux traditionnels :

- La qualité est uniforme et constante d'un lot à l'autre, un point qui revêt une importance critique pour les pratiques de gestion de l'eau et des engrais applicables à bon nombre de cultures.
- La plupart des substrats sont considérés comme essentiellement exempts de maladies et d'insectes, ce qui réduit les besoins et les coûts de pasteurisation. Ils sont aussi généralement considérés comme étant exempts de graines de mauvaises herbes.
- Ils sont moins susceptibles que les mélanges à base de terre des champs d'être contaminés par des résidus d'herbicides.
- Les ingrédients d'un mélange sans sol sont faciles à se procurer et la plupart sont plus légers que la terre.
- Les mélanges sans sol ont une plus grande porosité et retiennent plus d'eau que les mélanges à base de terre.

Rôles d'un bon substrat

Un bon substrat doit remplir quatre rôles fondamentaux :

- fournir le milieu nécessaire à l'ancrage du système racinaire;
- emmagasiner l'eau destinée à être absorbée par les racines entre les épisodes d'irrigation;

- offrir un milieu-tampon pour les éléments nutritifs qui seront absorbés par les racines;
- fournir l'oxygène (par ses interstices remplis d'air) nécessaire à la respiration des racines.

Ingrédients courants

Mousse de sphaigne

Il s'agit de l'un des matériaux les plus largement utilisés, en raison de ses caractéristiques physiques et de son prix. La mousse de sphaigne est une plante primitive qui pousse dans les tourbières. Tandis que la partie aérienne de la plante continue de pousser, la partie souterraine meurt et se décompose en tourbe. Les feuilles de mousse sont composées de cellules vivantes qui peuvent contenir de la chlorophylle ou non, de même que des cellules de « sphaigne » mortes qui contiennent de l'eau et de l'air. Les cellules de sphaigne mortes ont ceci de particulier qu'elles absorbent et conduisent l'eau. Leurs parois lignifiées les empêchent de s'affaisser lorsqu'elles s'assèchent. L'eau contenue dans ces cellules est absorbée par capillarité. Du fait de leur tensio-activité et de leur charge généralement négative, les cellules des feuilles et des tiges peuvent adsorber les éléments nutritifs (p. ex., les ions positifs) à la manière des particules d'argile. Les éléments nutritifs peuvent aussi être absorbés dans les cellules de sphaigne sous forme d'ions dissous dans l'eau.

Une tourbière de mousse de sphaigne présente une couche superficielle, une couche moyenne et une couche profonde. À cause du mode de croissance de la mousse de sphaigne, la mousse la plus vieille, la plus décomposée, se trouve au fond. Elle est de la couleur la plus sombre et est faite des particules les plus fines. La couche superficielle est plus jaunâtre et de texture plus grossière. Plus la mousse est grossière, plus son poids volumique apparent est faible, plus les interstices sont grands, plus sa capacité de rétention d'eau est faible (par unité de volume) et plus, par conséquent, sa qualité est grande.

La méthode de récolte de la mousse joue un rôle important dans la répartition de la taille des particules. La récolte peut se faire par aspiration ou par taillage de blocs. La récolte par aspiration consiste à fragmenter la surface de la tourbière, à la laisser sécher à l'air et à aspirer les fragments. La récolte en blocs consiste à prélever la mousse par gros morceaux qu'on laisse sécher pendant l'hiver. Le printemps suivant, on effrite

les blocs et on emballe le produit. La récolte en blocs de la mousse donne un produit plus grossier que la récolte par aspiration. Ce produit est généralement considéré comme étant celui qui est de la meilleure qualité, mais il est aussi plus cher.

La capacité d'échange cationique (CÉC) indique la quantité de cations qui peuvent être adsorbés par unité de poids et la façon dont leur assimilation par les végétaux sera régulée (tamponnée). En raison de sa forte CÉC, la mousse de sphaigne constitue une bonne réserve d'éléments nutritifs et un bon milieu-tampon. La mousse de sphaigne pure, toutefois, contient très peu d'éléments nutritifs, comme le montre la conductivité électrique mesurée sur extrait de substrat saturé (CÉ < 0,5 mS/cm).

En raison de son pH naturellement bas (3,5-4,5), la mousse de sphaigne est considérée comme exempte d'organismes pathogènes actifs, bien qu'elle puisse receler des spores dormantes ou des graines de mauvaises herbes.

Le coût modique de la mousse de sphaigne par unité de volume en fait l'un des ingrédients les plus utilisés dans les mélanges. Normalement, les mélanges commerciaux et ceux que les producteurs préparent eux-mêmes renferment de 50 à 100 % de mousse de sphaigne. La mousse de sphaigne généralement offerte sur le marché en Ontario a été comprimée. Elle prend de 40 à 60 % d'expansion selon le degré de compactage.

La mousse de sphaigne est de nature hydrophobe, surtout lorsqu'elle est sèche. Pour l'hydrater et la réhydrater uniformément, l'ajout d'un surfactant ou d'un agent mouillant non ionique est de toute première importance tout au long du cycle de croissance des cultures.

Vermiculite

La vermiculite est un produit apparenté au mica qui a été expansé par exposition à une très haute température (900 °C). Ce matériau peut être comparé aux particules d'argile, sauf qu'il a perdu ses capacités de gonfler et de rétrécir. Il possède une capacité d'échange cationique (CÉC) élevée, semblable, à poids égal, à celle de la mousse de sphaigne, et une très forte concentration d'ions potassium et magnésium. La vermiculite améliore la porosité du substrat, lui procure une meilleure structure (ce qui réduit son rétrécissement) et en facilite la réhumidification. Elle

peut également absorber de l'eau à l'intérieur, entre les plaquettes. Son pH est voisin de la neutralité et son poids volumique apparent de 80 à 100 kg/m³. On trouve en général trois types de vermiculite sur le marché, selon la taille des particules : grossière, fine et ordinaire. La vermiculite est extraite de mines situées en Afrique du Sud, aux États-Unis, en Chine et au Brésil.

Perlite

La perlite est un silicate d'aluminium d'origine volcanique qui a été porté à environ 1 000 °C. Constituée de cellules fermées, remplies d'air, elle ressemble à du maïs éclaté. L'eau est retenue principalement à la surface des particules et, dans une moindre mesure, à l'intérieur. Ce matériau inerte est surtout ajouté au substrat pour améliorer l'aération et le drainage ainsi que la stabilité structurale. Son pH est d'environ 7,0 tandis que sa CÉC est négligeable. Son poids volumique apparent est semblable à celui de la vermiculite ou de la mousse de sphagne, soit environ 100 kg/m³.

Fibre de coco

La fibre de coco est la moelle de la fibre grossière qui constitue un sous-produit de l'extraction des longues fibres de lignine de l'enveloppe externe du fruit. Avant sa transformation en produits destinés à l'horticulture, la fibre de coco est généralement lavée à l'eau claire, ce qui la débarrasse de l'excédent d'ions sodium et d'ions chlorures. La fibre de coco possède une forte capacité de rétention d'eau (de huit à neuf fois son poids sec). Elle possède d'excellentes propriétés mouillantes et une forte capacité d'échange cationique. Son pH oscille en général autour de 5,7 et 6,5. Avant d'utiliser la fibre de coco, les producteurs devraient toujours s'assurer qu'elle a été suffisamment lavée et débarrassée des concentrations éventuellement élevées de sodium et de chlorure en vérifiant la CÉ d'un échantillon de chaque chargement. La fibre de coco est offerte sous forme soit de briques comprimées de 1 L qui représentent 8-9 L de matière décomprimée, soit de fragments ou de plaques de 1 m conditionnées dans des manchons de plastique aux fins de la production de légumes de serre. Les briques comprimées qui ne prennent pas l'expansion voulue quand on les mouille devraient être jetées. À l'heure actuelle, la fibre de coco sert à la production de cultures de fleurs coupées de longue durée comme le gerbera et le rosier cultivés en

contenants ou dans des rigoles. La fibre de coco sert maintenant à la fabrication de pots biodégradables pour les cultures de plantes à massif printanières.

Laine de roche

La laine de roche est le produit du filage de roches basaltiques et calcaires en fusion. Il en existe deux formes : la laine de roche liée et la laine de roche granulaire. La matière de base est stérile et dépourvue de CÉC ou d'une teneur appréciable en sels solubles. La laine de roche liée est débitée en panneaux de 15 ou 20 cm de large, de 7,5 à 10 cm d'épaisseur et de 90 à 200 cm de long. On peut l'acheter avec ou sans feuille de plastique. Les panneaux renferment un liant destiné à en assurer la stabilité et un agent mouillant qui facilite l'absorption et la répartition de l'eau. La laine de roche granulaire ne contient ni liant ni agent mouillant et existe en trois qualités granulométriques (fine, moyenne, grossière). Les substrats contenant de la laine de roche granulaire sont plus poreux et retiennent mieux l'eau; ils sont aussi plus faciles à réhumidifier lorsqu'on les a laissés déshydrater. La laine de roche sert actuellement à la production de fleurs coupées de longue durée, comme la rose et le gerbera, et de légumes de serre.

On fabrique aussi un matériau semblable à la laine de roche à partir des scories de sidérurgie. Ce matériau, souvent appelé laine minérale, a généralement un pH relativement plus élevé (7-8) et des teneurs en oligo-éléments plus élevés que la laine de roche.

Copeaux de polystyrène

Il s'agit d'un sous-produit de la fabrication des panneaux de polystyrène. C'est un matériau inerte à CÉC négligeable et à pH voisin de la neutralité. Il joue le même rôle dans le substrat que la perlite, sauf qu'il ne retient pas l'eau à sa surface. Son poids volumique apparent est de 25 kg/m³. Il ne peut pas être pasteurisé, car il rétrécit. Les copeaux ont tendance à flotter à la surface du pot et peuvent poser un problème dans les systèmes avec sub-irrigation et recyclage de la solution. L'homogénéité du substrat peut aussi laisser à désirer à cause de la tendance des copeaux à se séparer des autres ingrédients. L'utilisation de ce matériau n'est pas recommandée du fait des préoccupations environnementales liées aux grains de polystyrène qui sont emportés par le vent ou qui atterrissent dans des cours d'eau et flottent à la surface de l'eau.

Turface®

Il s'agit d'une argile cuite à pH neutre (7,0). Comme son poids volumique apparent est de 750 kg/m^3 et que sa CÉC est élevée, dans le cas de la catégorie ordinaire, on l'utilise pour accroître le poids et le pouvoir tampon du substrat. Sa CÉC est comparable à celle de la vermiculite.

Haydite®

Il s'agit d'un type de schiste expansé par un traitement à $1\ 200\ ^\circ\text{C}$. Son poids volumique apparent est d'environ 800 kg/m^3 selon la granulométrie et la catégorie, et son pH est élevé (8,5-9,5). On en trouve plusieurs catégories différant par le calibre des particules. La capacité neutralisante de ce produit doit être prise en compte lorsqu'on l'utilise en quantités appréciables.

Gro-Bark®

L'écorce compostée peut contribuer à éliminer des substances toxiques et des phytopathogènes. Il faut généralement trois mois pour composter l'écorce de bois dur, tandis qu'il faut environ un mois et demi pour composter l'écorce de bois tendre. Avant le compostage, on ajoute généralement de l'azote à raison de 1 kg et $0,5 \text{ kg/m}^3$ pour l'écorce de bois dur et l'écorce de bois tendre respectivement. Gro-Bark® est un mélange commercial d'écorce de pin vieillie et de sciure qui a subi un compostage naturel pendant 10 à 40 ans. Son pH varie de 4,5 à 6,5 et sa teneur en sels est faible. Vendu en vrac uniquement, il sert généralement à pailler les allées, à amender le substrat des plants de pépinières élevés en contenant ou à remplacer la mousse de sphaigne.

Grow-Rich®

Grow-Rich® est un matériau composté issu de boues de papetières et d'autres matériaux organiques (fumiers, sciure et rafles de maïs). Son poids volumique apparent est d'environ 400 kg/m^3 , et la taille la plus courante de ses particules oscille entre 3 et 6 mm. Son pH varie entre 5,5 et 6,5. Sa teneur en sels solubles se situe autour de $1,5\text{-}2,0 \text{ mS/cm}$, mesurée sur extrait de substrat saturé. Par conséquent, le mélange d'empotage final ne doit pas contenir plus de 25 % de ce matériau.

Turricules

Sous-produit de l'élevage des lombrics (vers de terre), ce matériau est riche en matière organique et sa structure est stable. Son pH est de 6,0-7,5 et sa teneur en sels solubles se situe entre 1,0 et 1,5 mS/cm. Son poids volumique apparent est d'environ 200 kg/m^3 . Utiliser ce produit dans un substrat avec modération (moins de 25 % du volume), pour améliorer la stabilité structurale et la porosité. Ce matériau est quelque peu hydrophobe, il peut contenir des graines de mauvaises herbes et est assez coûteux.

Sable

Même si, sur le plan technique, il s'agit d'un type de sol, le sable est assez souvent incorporé dans des mélanges sans sol à la seule fin de les lester. Il est en effet à peu près quinze fois plus lourd que les autres principaux composants (mousse de sphaigne, perlite et vermiculite). L'utilisation de sable comporte néanmoins certains inconvénients :

- son action abrasive sur les autres ingrédients réduit les interstices remplis d'air, si le malaxage est trop long;
- il est susceptible d'être infesté de phytopathogènes et doit donc être pasteurisé.

En revanche, le sable (tout comme la terre) améliore la capacité d'humidification du mélange. Selon sa provenance en Ontario, le sable possède souvent un pH élevé (environ 8,5), ce qui indique la présence de carbonates de calcium libres. Lorsqu'on utilise du sable, on doit tenir compte de sa capacité neutralisante.

Caractéristiques physiques d'un mélange sans sol

Un mélange sans sol, tout comme le sol, comporte trois grandes composantes : air, particules solides et eau. Les interstices remplis d'air, qui constituent l'espace poral ou espace lacunaire, sont nécessaires pour oxygéner les racines, assurer la nitrification et permettre une certaine activité microbienne. Les interstices d'un mélange complètent la portion eau, étant donné que l'air y remplace l'eau quand elle a été absorbée par les racines. Le rapport air-eau d'un mélange est déterminé par la taille des particules solides. Après un arrosage, l'air pénètre dans un

mélange grossier plus rapidement que dans un mélange plus fin, mais il ne s'y répartit pas toujours uniformément. Par conséquent, un mélange grossier comporte relativement plus d'interstices remplis d'air et moins d'interstices remplis d'eau qu'un substrat plus fin. Le manque d'air peut poser un problème lorsqu'on utilise un mélange à texture fine durant les périodes de l'année où la luminosité est faible. Un autre facteur qui influence le rapport air-eau est la hauteur du pot; plus le pot est haut, plus le rapport air-eau est grand, surtout dans le haut du pot.

Dans un mélange sans sol qui vient d'être arrosé, l'eau peut occuper jusqu'à 75 % du volume, les solides 5 à 10 % et l'air 15 à 20 %. Par contre, dans un substrat à base de terre, les solides occupent 50 % du volume, le reste étant divisé entre l'air et l'eau. Cette différence majeure fait en sorte que chacun de ces substrats nécessite une conduite différente. Le poids volumique apparent de la plupart des mélanges sans sol est d'environ 100-200 kg/m³. Le rétrécissement du substrat pose certaines difficultés à cause non seulement du changement des caractéristiques physiques, mais aussi à cause du volume requis dans un pot de grosseur donnée. La mousse de sphaigne et la laine de roche sont deux matériaux qui se tassent. En ajoutant au substrat une composante qui renforce la structure comme la perlite ou la vermiculite, ou en tassant le substrat au moment du remplissage des pots, on peut réduire la perte de volume.

Voir aussi le tableau 3-6, *Exemple d'un mélange sans sol avec amendements*, ci-contre.

Préparation d'un mélange sans sol

Voici les points à considérer au moment de préparer un mélange sans sol :

- capacité de rétention d'eau;
- porosité non capillaire;
- biodisponibilité des éléments nutritifs;
- pouvoir tampon;
- poids;
- prix.

Tableau 3-6. Exemple d'un mélange sans sol avec amendements

Ingrédients	Pourcentage (par unité de volume)
Mousse de sphaigne	50-60 %
Vermiculite, perlite, polystyrène, écorce, laine de roche granulaire	20-40 %
Turface® , Haydite® , sable	10-20 %
Amendements	Quantité/m ³ de mélange
Chaux (dolomitique, fine)	3,5 kg
Superphosphate	1,5 kg
Nitrate de potassium (12-0-44) ou nitrate d'ammonium (34-0-0)	1,0/0,4 kg
Oligo-éléments OU substrat prémélangé (2-3-6 + oligoéléments)	0,25-0,5 kg, voir le fournisseur
Agent mouillant	100 mL

Le principal constituant de la plupart des mélanges sans sol est la mousse de sphaigne, car celle-ci possède des caractéristiques très favorables à la croissance. La qualité de la mousse de sphaigne est importante étant donné qu'elle est le principal ingrédient. Une mousse grossière renferme un espace poral naturel plus grand et peut entrer dans un mélange en plus forte proportion. Une mousse plus fine, dont l'espace poral est réduit, doit être en moins grande proportion dans le mélange final. Pour aérer le mélange et le structurer (qu'il rétrécisse moins), il est bon d'utiliser l'un ou plusieurs des ingrédients suivants : vermiculite, perlite, laine de roche granulaire ou fibre de coco. La vermiculite et la laine de roche sont d'excellents matériaux car ils augmentent la capacité de rétention d'eau ainsi que le pouvoir de réhumidification du mélange. On ajoute un troisième ingrédient (Turface®, Haydite® ou sable) pour ajouter du poids au mélange et augmenter son pouvoir tampon et/ou son espace poral.

On ajoute de la chaux (3,5 kg/m³ de mélange) pour porter le pH du mélange à un niveau acceptable (sur la base d'un mélange contenant 50 % de mousse de sphaigne). La quantité de chaux indiquée ne tient pas compte de l'effet neutralisant que peuvent avoir d'autres ingrédients (comme le Haydite® et le sable) ni de l'effet acidifiant de certains engrais (p. ex., nitrate d'ammonium). Une fois qu'on a préparé le mélange et qu'on l'a arrosé, il faut parfois une semaine pour que son pH se stabilise.

Lorsqu'on emploie de la chaux calcique, il faut faire un apport de magnésium sous forme de sels d'Epsom

(0,5 kg/m³). On ajoute du superphosphate pour l'apport en phosphore, en soufre et en calcium. S'il faut ajouter de l'azote et/ou du potassium, utiliser du nitrate de potassium (12-0-44) à raison de 0,5-1,0 kg/m³ ou du nitrate d'ammonium (34-0-0) à raison de 0,3-0,5 kg/m³. L'ajout d'azote doit correspondre à environ 0,25-0,50 g d'azote par pot de 15 cm. Dans certains cas, on peut utiliser du nitrate de calcium comme source d'azote à raison de 0,5 kg/m³. On peut employer un mélange d'oligo-éléments comme Nutritrace pour ajouter les éléments-traces suivants : fer (Fe), cuivre (Cu), bore (B), zinc (Zn) et manganèse (Mn). Un surfactant non ionique comme Aqua-Grow® ou Agral-90 constitue un agent mouillant convenable. L'ajouter à l'eau et le pulvériser sur le mélange pour assurer une répartition uniforme. Parfois, une combinaison d'oligo-éléments et d'agent mouillant est offerte sous forme granulaire. Pour des raisons pratiques, bien des producteurs font mélanger au préalable les amendements par leur fournisseur de fertilisant. La plupart des ingrédients peuvent être mélangés quand ils sont secs. On peut utiliser des mélangeurs mécaniques à vis ou à tambour, mais en limitant le temps de malaxage des composants pour ne pas les pulvériser. Ajouter de l'eau pendant le mélange des ingrédients pour prévenir la formation de poussière et aider à stabiliser les particules. La plupart des producteurs utilisent des substrats artificiels constitués de mélanges sur mesure que les fournisseurs de mousse de sphaigne leur préparent en fonction de leurs besoins propres et leur livrent.

Caractéristiques chimiques d'un mélange sans sol

Une fois qu'un substrat est préparé, on doit toujours vérifier sa teneur en sels solubles (CÉ) et son pH. La mesure de la CÉ de la solution donne un indice de la valeur nutritive du mélange, tandis que la mesure du pH joue un rôle clé en déterminant la biodisponibilité des éléments nutritifs (voir la rubrique *Conductivité électrique*, p. 27). Le pH optimal des mélanges sans sol organiques se situe autour de 5,5 (± 0,5). Ce niveau contraste avec le pH de 6,5 qui est recommandé pour les mélanges à base de terre ou de terreau. Dans les mélanges renfermant de la mousse de sphaigne, un pH élevé (supérieur à 6,5) peut entraîner des carences en fer (Fe), en manganèse (Mn), en bore (B), en cuivre (Cu), en zinc (Zn) et en phosphore (P), tandis qu'un pH qui se situe entre 5,0 et 5,5 peut provoquer une carence en molybdène (surtout chez le poinsettia). L'ajout de nitrate d'ammonium (34-0-0) à raison de 400 g/m³ peut abaisser le pH d'environ 0,5.

Mélanges prêts à l'emploi

La plupart des mélanges commerciaux ont été mis à l'épreuve et donnent de bons résultats si les cultures sont bien conduites. Pour comparer leurs prix avec ceux des mélanges maison, il faut faire entrer en ligne de compte, outre le prix des ingrédients, les coûts liés à la confection du mélange, à la machinerie, à l'entreposage et à la main-d'œuvre. Les exploitations de petite taille utilisent souvent des mélanges déjà préparés. Certains fabricants acceptent de préparer des mélanges selon les spécifications du producteur. En règle générale, les mélanges prêts à l'emploi contiennent les deux premiers ingrédients principaux indiqués dans le tableau 3-6, mais non le troisième (Turface® ou sable). La plupart ont un pH de 5,5 à 6,0 et une CÉ de 1,2 à 1,8 mS/cm (mesures prises sur extrait du mélange saturé), tandis que la capacité de rétention d'eau est d'environ 70 % du volume (mesurée à l'aide d'un pot de 15 cm de diamètre qu'on a totalement saturé puis laissé s'égoutter).

Composts

Certains producteurs peuvent décider d'utiliser des produits de compostage dans leur mélange sans sol, particulièrement dans le cas des cultures en pots cultivées au champ dans de gros contenants comme les vivaces. Les composts peuvent contenir des champignons et des bactéries antagonistes (qui attaquent certains phytopathogènes) ainsi que des micro-organismes utiles (comme les bactéries nitrifiantes). Certains fournisseurs vendent en vrac, à coût relativement intéressant, des composts faits d'assortiments de sous-produits organiques. Ces composts peuvent donner de bons résultats comme amendements, mais il est conseillé d'en vérifier le pH et la teneur en sels solubles avant de les utiliser.

Problèmes courants posés par les mélanges sans sol

- Un malaxage trop long des ingrédients d'un mélange sans sol a un effet abrasif sur les particules et détériore la structure du substrat. En règle générale, un malaxage de 3-5 minutes à 12-14 tr/min suffit.
- La réhumidification d'un substrat qu'on a laissé déshydrater est possible, quoique difficile. On peut soit faire plusieurs arrosages légers ou des brumisations, soit ajouter un agent mouillant à l'eau, à raison d'environ 1 mL/L d'eau tiède. Normalement, on ajoute l'agent mouillant au

moment de mélanger les ingrédients parce que la mousse de sphaigne est hydrophobe.

- Pendant les productions ayant une période de culture dépassant six à huit semaines, il faut ajouter un agent mouillant ou un surfactant pour assurer un mouillage uniforme dans chacun des contenants mais également dans l'ensemble de la culture. C'est un problème commun dans les cultures produites par sub-irrigation. Les agents mouillants se dégradent au cours du temps. Ajouter un agent mouillant par le système d'irrigation en respectant les doses recommandées par le fabricant. Deux des agents mouillants possibles sont Aqua-Grow 2000 L et Deluge.
- Si on a utilisé une dose excessive d'agent mouillant incorporé dans le substrat (de deux à trois fois la dose recommandée, par exemple), les plantes peuvent ne former que quelques racines longues et fines ou des racines qui n'arrivent pas à pénétrer dans le substrat. Il peut en résulter une chétivité générale des plants, chez les espèces sensibles, dont l'impatiente, le bégonia et le concombre.
- La prolifération des algues à la surface peut nuire à la levée des plantules et à la pénétration de l'eau et/ou contribuer à nourrir les mouches des terreaux. Certains fongicides peuvent réduire la prolifération d'algues. À mesure que les plants se développent, la surface du substrat reçoit de moins en moins de lumière, ce qui freine la croissance des algues. Des produits à base de peroxyde d'hydrogène comme Zeritol sont couramment utilisés. L'emploi d'une eau d'irrigation exempte d'algues contribue également à régler le problème.
- Les niveaux optimaux d'éléments nutritifs sont souvent plus élevés que dans un mélange à base de terre. Par conséquent, il est important de veiller à ce que la culture reste bien fertilisée. La teneur en sels solubles peut atteindre sans danger environ deux fois celles des mélanges à base de terre.
- Les symptômes d'une carence en magnésium se manifestent rapidement sur des cultures comme la tomate et le chrysanthème étant donné que cet élément n'est pas inclus dans la plupart des engrais « complets » hydrosolubles traditionnels. Une incorporation en préplantation ou des apports séparés de sels d'Epsom (sulfate de magnésium) ou de nitrate de magnésium peuvent contribuer à prévenir le problème.

Éléments nutritifs nécessaires à la croissance des plantes

On peut diviser les éléments nutritifs en macro-éléments et en oligo-éléments, selon la quantité requise par les plantes (voir le tableau 3-7, *Macro-éléments et oligo-éléments dans les végétaux*, ci-dessous, qui montre aussi la forme sous laquelle l'élément est assimilé par la plante et sa remobilisation à l'intérieur de celle-ci).

Tableau 3-7. Macro-éléments et oligo-éléments dans les végétaux

Éléments	Forme	Mobilité dans les plantes*
Macro-éléments primaires		
Azote (N)	Azote ammoniacal (NH ₄ ⁺), azote des nitrates (NO ₃ ⁻)	Élevée
Phosphore (P)	Phosphate de dihydrogène (H ₂ PO ₄ ⁻)	Élevée
Potassium (K)	Ions potassium (K ⁺)	Élevée
Macro-éléments secondaires		
Calcium (Ca)	Ions calcium (Ca ²⁺)	Faible
Magnésium (Mg)	Ions magnésium (Mg ²⁺)	Élevée
Soufre (S)	Ions sulfates (SO ₄ ²⁻), dioxyde de soufre (SO ₂)	De faible à moyenne
Oligo-éléments		
Fer (Fe)	Ions ferreux (Fe ²⁺), ions ferriques (Fe ³⁺)	Faible
Manganèse (Mn)	Ions manganèse (Mn ²⁺)	Faible
Cuivre (Cu)	Ions cuivre (Cu ²⁺)	Faible
Zinc (Zn)	Ions zinc (Zn ²⁺)	Faible
Molybdène (Mo)	Ions molybdates (MoO ₄ ²⁻)	De moyenne à élevée
Bore (B)	Acide borique (H ₃ BO ₃)	De faible à moyenne
Chlore (Cl)	Ions chlorures (Cl ⁻)	Élevée
Éléments utiles d'intérêt pour certaines cultures de serre**		
Silicium (Si)	H ₄ SiO ₄	Faible
Aluminium (Al)	Ions aluminium (Al ³⁺)	De moyenne à élevée

* Les éléments nutritifs sont généralement classés en fonction de leur capacité à se déplacer et à se remobiliser dans les végétaux. Les éléments nutritifs mobiles se déplacent des tissus sénescents ou des vieilles feuilles (la source) vers des fleurs ou des feuilles en croissance (le puits) quand il n'y en a plus en quantités suffisantes dans le milieu racinaire. Les éléments nutritifs aptes à la remobilisation se dirigent vers les parties des plantes où ils sont le plus en demande, c.-à-d., vers les puits les plus importants. Par ordre décroissant, les puits les plus importants sont les suivants : fruits, fleurs, nouvelles feuilles, vieilles feuilles et racines.

** Le silicium et l'aluminium ont été inclus comme éléments utiles d'intérêt pour certaines cultures de serre. Il a été démontré que le silicium améliore le rendement de certaines cultures de serre, notamment celle du concombre, et réduit l'incidence de l'oïdium (blanc). Durant le forçage des hortensias, l'application d'aluminium au moment opportun et un pH faible sont nécessaires à la production de fleurs bleues.

Les éléments nutritifs considérés comme immobiles, à l'échelle des plantes entières, ne sortent généralement pas hors de l'organe qui constitue leur « destination ultime », ce qui se traduit par des symptômes de carence qui se manifestent sur les nouvelles pousses au fur et à mesure que la carence s'accroît dans le milieu racinaire.

Deux grands facteurs influencent la teneur en minéraux d'une plante. Le premier est d'ordre génétique; il explique pourquoi les teneurs en azote (N) et en potassium (K) de nombreuses plantes (4-6 %) sont à peu près dix fois plus élevées que les teneurs en phosphore (P) et en magnésium (Mg), qui, à leur tour, sont de cent à mille fois plus élevées que la teneur en la plupart des oligo-éléments.

Le second facteur est la biodisponibilité des éléments nutritifs dans le substrat et la capacité de la plante à les absorber. Dans la pratique, c'est le seul facteur sur lequel il est possible d'agir. Jusqu'à un certain point, la teneur en éléments nutritifs d'une plante augmente de pair avec celle du substrat. Au-delà de ce niveau optimal, il n'y a aucun avantage à attendre d'une augmentation supplémentaire de la biodisponibilité.

Absorption et diffusion des éléments nutritifs indispensables à la croissance des plantes

Éléments non fertilisants

Le carbone est absorbé essentiellement sous forme de CO_2 par les stomates des feuilles. Il est par la suite transformé en matière organique sous l'effet de la photosynthèse. Dans une moindre mesure, le carbone peut aussi être absorbé sous forme de bicarbonate (HCO_3^-) à partir de la solution nutritive. L'eau est la principale source d'ions hydrogène, qui sont absorbés par les poils racinaires. L'oxygène est absorbé comme le CO_2 pendant la journée et par les racines, sous forme d'oxygène dissous dans l'eau. Ensemble, ces éléments représentent environ 90 % du poids sec de la plupart des tissus végétaux.

Macro-éléments

En général, tous les macro-éléments à l'exception du calcium sont mobiles à l'intérieur de la plante. Les éléments nutritifs mobiles peuvent être véhiculés par le

xylème et par le phloème jusqu'aux organes qui en ont le plus besoin, habituellement les pousses, les fleurs ou les bractées en croissance.

Macro-éléments primaires

Azote – les deux formes, l'azote ammoniacal (NH_4^+) et l'azote des nitrates (NO_3^-), peuvent être absorbées par les racines et métabolisées par les plantes. La vitesse d'absorption du NO_3^- est habituellement supérieure à celle du NH_4^+ . Toutefois, cette vitesse dépend en grande partie du pH. L'absorption de NH_4^+ est favorisée par un substrat neutre et décroît lorsque le pH s'abaisse. L'inverse se produit pour le NO_3^- . Des concentrations élevées de glucides dans la plante (l'été, par exemple) favorisent l'absorption du NH_4^+ . À l'intérieur du xylème, l'azote est transporté sous forme de nitrate et d'acides aminés. L'azote représente généralement entre 3,5 et 5,0 % du poids sec des tissus végétaux.

Phosphore – le gros du P est absorbé activement (à partir des concentrations très faibles qui se trouvent dans le sol jusqu'aux niveaux élevés qu'on trouve dans le xylème) sous forme de H_2PO_4^- . Le phosphore représente entre 0,3 et 0,6 % du poids sec des tissus végétaux.

Potassium – est prélevé, souvent activement, sous forme de K^+ , et est mobile dans la plante. Il représente approximativement entre 4,0 et 5,5 % du poids sec des tissus végétaux, selon l'espèce.

Macro-éléments secondaires

Calcium – est absorbé passivement (à partir des concentrations élevées dans le sol jusqu'aux faibles concentrations qu'on trouve dans la plante) sous forme de Ca^{2+} . Le calcium qui se trouve dans la sève du xylème est transporté vers le haut, entraîné par le mouvement imprimé par la transpiration. Son déplacement dépend donc de la vitesse de transpiration et par conséquent de l'humidité (ou du déficit de tension de vapeur). L'absorption est aussi favorisée par le NO_3^- . Dans la plante, le calcium n'est pas mobile. Il représente généralement entre 1,0 et 1,5 % du poids sec des tissus végétaux.

Magnésium – la compétition exercée par les autres cations (p. ex., potassium et ammonium) est importante dans la détermination de la vitesse d'absorption du magnésium. Cet élément est absorbé passivement par le flux de transpiration mais son mouvement dans les racines peut être fortement

influencé par la concentration de potassium. Il est mobile dans le xylème quand les concentrations sont faibles, ce qui amène une dégradation des molécules de chlorophylle (dont il constitue l'ion central) dans les feuilles inférieures et son déplacement dans le xylème et le phloème vers les point végétatifs actifs. Le magnésium représente généralement entre 0,5 et 1,0 % du poids sec des tissus végétaux.

Soufre – les plantes absorbent le soufre principalement sous forme de sulfate (SO_4^{2-}). Son absorption peut se faire activement. Le soufre représente généralement 0,5 % du poids sec des tissus végétaux.

Oligo-éléments

Tous les oligo-éléments sont essentiellement immobiles. Ils peuvent être absorbés par les racines et transportés par le flux de la transpiration vers les différents organes de la plante. Par contre, la plante ne peut pas mobiliser les oligo-éléments qui se trouvent dans ses tissus pour les envoyer vers d'autres organes qui en auraient besoin.

Fer – son absorption est influencée par la vitesse du métabolisme de la plante ainsi que par la présence d'autres cations comme le manganèse (Mn^{2+}) et le cuivre (Cu^{2+}). L'absorption du fer est freinée par un pH élevé, des dommages aux racines et de fortes concentrations de phosphate, de manganèse, de bore et de calcium; elle est favorisée par une teneur élevée en ammonium (NH_4^+). Le fer (Fe^{3+}) ne passe pas d'une partie de la plante à l'autre.

Manganèse – son absorption est influencée par le métabolisme de la plante (comme dans le cas du fer). Des températures du sol fraîches mènent à une faible activité métabolique et du coup à une absorption réduite (rosiers dans les lits de plantation l'hiver, par exemple). Le manganèse est relativement immobile dans la plante. Les tissus jeunes sont habituellement riches en Mn^{2+} . La biodisponibilité du manganèse est améliorée par un pH faible.

Cuivre – mêmes remarques que pour le fer et le manganèse. Le cuivre (Cu^{2+}) n'est pas très mobile à l'intérieur du plant, mais peut passer des feuilles plus vieilles vers des feuilles plus jeunes sous certaines conditions. On en trouve ordinairement de très faibles concentrations dans le plant comparativement à d'autres oligo-éléments.

Zinc – les chercheurs sont divisés sur la question de savoir si l'absorption du zinc (Zn^{2+}) est active ou passive, quoique la majorité d'entre eux la croient active. Le zinc a une forte interaction avec le cuivre. Le zinc n'est pas très mobile à l'intérieur de la plante.

Molybdène – on ne sait pas grand-chose au sujet du molybdène (MoO_4^{2-}), si ce n'est qu'il s'agit de l'élément dont les apports nécessaires comptent parmi les plus faibles. En floriculture, le poinsettia est l'une des rares espèces de plantes que l'on sait sensibles à de faibles concentrations de cet élément. Les carences sont souvent associées à de faibles pH et à des teneurs élevées du substrat en ammonium. Le molybdène est important pour le fonctionnement d'une enzyme qui joue un rôle crucial dans le métabolisme de la plante.

Bore – cet élément est probablement absorbé sous une forme non dissociée de l'acide borique (H_3BO_3) et suit le flux de l'eau absorbée par les racines. Il est immobile à l'intérieur de la plante et se concentre surtout dans les feuilles les plus vieilles. Les symptômes d'une carence en bore se manifestent aux extrémités de la plante et ceux d'une toxicité dans les vieilles feuilles.

Chlore – cet élément est facilement absorbé par les plantes sous forme d'ions chlorures (Cl^-). Il est très soluble et très mobile. Les ions chlorures interviennent dans la régulation stomatique et la photosynthèse. Une très grande sensibilité à de fortes concentrations d'ions chlorures est observée, particulièrement au stade de plantules, chez la plupart des cultures de serre et à tous les stades de croissance chez les fougères, les dracaenas et les lis.

Analyse des éléments nutritifs

Des laboratoires de l'Ontario peuvent effectuer l'analyse de l'eau, des substrats et des tissus végétaux pour en connaître la teneur en éléments nutritifs (voir l'annexe C, *Laboratoires de l'Ontario effectuant des analyses des tissus végétaux, des solutions nutritives et des substrats utilisés en serriculture*, p. 172).

Eau

L'eau non traitée utilisée pour l'irrigation peut contenir tous les principaux éléments nutritifs nécessaires aux plantes. On ne peut toutefois rajuster les teneurs de chacun d'eux qu'à partir des résultats d'une analyse.

L'analyse indiquera si la source d'eau convient à l'irrigation ou si les concentrations d'ions spécifiques comme les ions sodium (Na), les ions fluorures (F⁻) ou le bore (B) peuvent être trop élevées. En plus du pH, il faut connaître la concentration de bicarbonates (ppm ou meq/L), pour pouvoir calculer la quantité d'acide nécessaire à l'obtention du pH recherché. Le tableau 3-8, *Concentrations maximales souhaitables de certains ions dans l'eau non traitée utilisée pour l'irrigation des mélanges sans sol (laine de roche, oasis, mousse de sphaigne ou fibre de coco) dans une serre*, ci-dessous, indique les principaux éléments nutritifs nécessaires aux plantes et leur teneur souhaitable dans l'eau non traitée utilisée pour l'irrigation.

Tableau 3-8. Concentrations maximales souhaitables de certains ions dans l'eau non traitée utilisée pour l'irrigation des mélanges sans sol (laine de roche, oasis, mousse de sphaigne ou fibre de coco) dans une serre

Élément	Concentration maximale souhaitable (ppm)
Azote (NO ₃ ⁻)	5
Phosphore (H ₂ PO ₄ ⁻)	5
Potassium (K ⁺)	5
Calcium (Ca ²⁺)	120
Magnésium (Mg ²⁺)	25
Chlorure (Cl ⁻)	100
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	200
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	30-60
Sodium (Na ⁺)	60
Fer (Fe ³⁺ ou Fe ²⁺)	5
Bore (B)	0,5
Zinc (Zn ²⁺)	0,5
Manganèse (Mn ²⁺)	1,0
Cuivre (Cu ²⁺)	0,2
Aluminium (Al ³⁺)	5
Molybdène (Mo)	0,02
Fluorure (F ⁻)	1
pH (H ⁺)	5,0-7,0

Source : L'information présentée dans ce tableau a été colligée et adaptée au fil du temps par les spécialistes de la serriculture de l'Université de Guelph et du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO).

Voici quelques remarques générales concernant les divers éléments nutritifs :

N, P, K – Même si l'azote, le phosphore et le potassium sont des éléments fertilisants, leur présence en concentrations élevées dans l'eau non traitée est un signe de contamination.

Ca²⁺ et Mg²⁺ – Les concentrations maximales souhaitables indiquées ci-dessus comblent adéquatement les besoins nutritifs de la plupart des cultures. Des valeurs plus élevées n'entraînent pas nécessairement des réactions de toxicité, mais peuvent contribuer à la dureté de l'eau et à la formation de composés insolubles à l'extrémité des goutteurs.

HCO₃⁻ – La plupart des sources d'eau du sud de l'Ontario ont une teneur en bicarbonates (HCO₃⁻) supérieure à la fourchette indiquée. Les bicarbonates ne sont pas très toxiques, mais des concentrations de 250 ppm ou plus peuvent nuire à la croissance des plantes. Des niveaux élevés de bicarbonates s'accompagnent d'un niveau d'alcalinité (pH) élevé, qui, avec le temps, peut élever le pH du substrat. Un autre inconvénient est la précipitation du calcium et/ou des carbonates de magnésium qui laisse des résidus sur les feuilles et encrasse les goutteurs du réseau d'irrigation. De fortes concentrations de bicarbonates se neutralisent à l'aide d'acide nitrique, phosphorique ou sulfurique (voir la rubrique *Correction du pH*, p. 33).

Fe³⁺ – Dans sa forme oxydée, le fer a une faible solubilité et peut donc facilement précipiter sous forme d'hydroxyde de fer amorphe qui encrasse les goutteurs du réseau d'irrigation. Dans les serres avec irrigation goutte-à-goutte, les teneurs supérieures à 0,25 ppm sont donc déconseillées.

B – Le bore peut être assez toxique pour les plantes et doit être surveillé de près dans les substrats (moins de 0,5 ppm) ainsi que dans les systèmes où l'eau est recyclée (moins de 0,25 ppm).

Zn²⁺ – Le zinc se retrouve dans les sources d'eau qui ont été en contact avec du métal galvanisé sans revêtement (l'eau de pluie provenant du toit de la serre lorsque les gouttières sont en métal galvanisé non traité). Ici encore, les ions peuvent s'accumuler dans les réseaux de recirculation de l'eau.

Mn²⁺ – Bien que le manganèse ne pose pas souvent problème, sauf sous des conditions particulières (p. ex., pasteurisation à la vapeur), on croit qu'il est toxique à des concentrations élevées, lorsqu'il s'accumule dans les tissus végétaux les plus âgés.

Cu²⁺ – Les concentrations de cuivre peuvent dépasser (jusqu'à 0,5 ppm) la valeur de 0,2 ppm recommandée au tableau 3-8, p. 43, si l'on se sert de substrat organique plutôt que de substrat inerte.

Al³⁺, Mo, Cl⁻, F⁻ – L'aluminium, le molybdène et les fluorures ne sont pas des éléments qu'on retrouve souvent en fortes concentrations dans les sources d'eau. Toutefois, les chlorures et les fluorures peuvent nuire gravement aux cultures monocotylédones (lis, dracaenas, plante-araignée). Les produits de nettoyage employés pour enlever le badigeon sur le toit des serres ne doivent pas être évacués vers une eau de surface, une citerne ni un étang, car ils contiennent souvent des fluorures.

pH – Bien que les ions hydrogène ne soient pas considérés comme des éléments nutritifs, il est important d'en tenir compte étant donné que la biodisponibilité de la plupart des éléments nutritifs est liée au pH. Par exemple, la plupart des ions chargés positivement, tels que le fer (Fe), le manganèse (Mn), le calcium (Ca), ainsi que les phosphates, sont plus solubles (et donc plus assimilables par la plante) à un pH faible, tandis que le molybdène est plus facilement assimilable à un pH plus élevé. La plupart des sources d'eau en Ontario ont un pH d'environ 7,5, en raison des teneurs élevées en bicarbonates. L'acidification peut être nécessaire (voir la rubrique *Correction du pH*, p. 33). Un pH inférieur à 5,0 détériore la structure des plaques de laine de roche et peut donner des racines grosses et courtes.

Voir à l'annexe C, *Laboratoires de l'Ontario effectuant des analyses des tissus végétaux, des solutions nutritives et des substrats utilisés en serriculture*, p. 172, la liste des laboratoires de l'Ontario à même d'effectuer des analyses de l'eau, des solutions nutritives et des substrats.

Dosage des mélanges sans sol

Pendant longtemps, la méthode la plus utilisée pour doser les éléments nutritifs était la méthode appelée « Spurway » ou méthode de l'extrait de substrat dilué (1 volume de substrat pour 2 volumes d'eau). Aujourd'hui, en Amérique du Nord, c'est la méthode de l'extrait de substrat saturé à l'eau distillée qui est la plus utilisée. Elle dose les éléments nutritifs directement dans l'extrait. Elle permet d'estimer la quantité d'éléments nutritifs facilement assimilable qui se trouve dans la zone racinaire.

Échantillonnage du substrat

Sol – À l'aide d'une sonde, prélever une vingtaine d'échantillons de la zone étudiée (couche ou planche) à une profondeur d'environ 10-25 cm et bien mélanger les échantillons ainsi prélevés. De ce mélange, prélever un échantillon représentatif (environ 600 g), le déposer dans un sac de plastique et l'expédier à un laboratoire qui offre le service d'analyse selon la méthode de l'extrait de substrat saturé (voir la rubrique *Comment mesurer la CÉ d'un substrat*, p. 29, et l'annexe C, *Laboratoires de l'Ontario effectuant des analyses des tissus végétaux, des solutions nutritives et des substrats utilisés en serriculture*, p. 172). Des frais sont exigés pour ce service. Dans le cas des cultures saisonnières, bien analyser le sol avant la mise en culture. Faire faire l'analyse suffisamment à l'avance (au moins 10 jours) pour pouvoir corriger le pH et la fertilisation avant la mise en culture.

Substrat d'empotage – N'échantillonner que les deux tiers inférieurs du substrat d'empotage; ne pas inclure la couche superficielle, surtout si l'on pratique la sub-irrigation. Mélanger 8-10 échantillons, en prélever une quantité représentative d'environ 600 g et la faire parvenir au laboratoire dans un sac de plastique. Les producteurs devraient mesurer eux-mêmes la CÉ et le pH (entre les échantillonnages périodiques soumis au laboratoire) dans l'eau de percolation recueillie après l'arrosage abondant d'un certain nombre de pots avec de l'eau distillée ou faire eux-mêmes leur propre analyse par la méthode de l'extrait de substrat saturé (voir la rubrique *Comment mesurer la CÉ d'un substrat*, p. 29). Les résultats obtenus seront très proches de

ceux que le laboratoire obtient à l'aide de la même méthode (voir la rubrique *Interprétation des mesures de la CÉ*, p. 29) et donnent une bonne indication du niveau de fertilité global, mais non des teneurs en éléments individuels. Pour suivre l'évolution des teneurs en éléments nutritifs dans le substrat, prélever des échantillons toutes les deux semaines.

Pour savoir comment interpréter les résultats et rajuster les paramètres du substrat, consulter un spécialiste de la floriculture de serre.

Analyse foliaire

En floriculture, l'analyse foliaire sert surtout d'outil diagnostique pour vérifier les symptômes de carence ou de toxicité, mais elle peut aussi servir à surveiller les niveaux d'éléments nutritifs au cours de la période de culture. Différentes parties de la plante renferment différents niveaux d'éléments nutritifs, mais l'analyse des tissus foliaires est le plus couramment utilisée pour diagnostiquer la biodisponibilité des éléments nutritifs dans le sol. La concentration de minéraux dans les plantes est habituellement exprimée en pourcentage par rapport au poids pour les macro-éléments (azote, phosphore, potassium, etc.) et en milligrammes par gramme (mg/g) ou parties par million (ppm) de matière sèche végétale pour les oligo-éléments (fer, manganèse, cuivre, zinc, bore, molybdène). L'âge des parties des plantes a aussi son importance. Les jeunes tissus ont tendance à avoir une teneur plus élevée en azote, phosphore et potassium que les tissus plus vieux, lesquels ont généralement des teneurs plus élevées en calcium, manganèse, fer et bore. Il faut donc récolter les feuilles entièrement déployées qui ont été les dernières à parvenir à maturité si l'on fait faire régulièrement des analyses foliaires dans le but d'évaluer la teneur en éléments nutritifs.

L'analyse foliaire évalue souvent de façon plus précise les teneurs en oligo-éléments dans les plantes ou le programme de fertilisation que l'analyse du substrat. On prélève les feuilles parmi celles qui sont récemment parvenues à maturité sur plusieurs plants, sauf exception (habituellement, 30-50 feuilles suffisent). On ne doit pas prélever les feuilles qui présentent des

anomalies, à moins qu'on veuille en diagnostiquer la cause, auquel cas, on constitue un échantillon distinct. S'assurer que les échantillons ne sont pas contaminés par des pesticides ou des applications foliaires de fertilisant. En cas de doute, rincer les feuilles avec de l'eau distillée et attendre qu'elles soient sèches avant de les emballer et de les faire parvenir au laboratoire. Expédier les échantillons de feuilles dans des sacs de papier pour éviter la pourriture des feuilles durant le transport.

Le tableau 3-9, *Lignes directrices relatives à l'analyse des tissus*, p. 46, indique les fourchettes dans lesquelles doivent se situer les concentrations d'éléments nutritifs pour certaines cultures florales. Divers facteurs peuvent faire varier ces concentrations : l'âge de la plante, la position des feuilles sur le plant (partie supérieure ou inférieure du plant), le cultivar, la saison, le programme de fertilisation, le nombre de jours depuis la fertilisation, le pH du substrat, l'application d'un régulateur de croissance, la présence de maladie et la température. Les concentrations des éléments nutritifs nécessaires aux différentes plantes sont données uniquement à titre indicatif.

Partie de la plante à échantillonner :

- chrysanthème – feuilles supérieures des rameaux florifères à maturité;
- exacum – extrémité des rameaux avec une paire de feuilles à maturité et toutes les feuilles non arrivées à maturité;
- rosier – feuille à cinq folioles la plus haute sur les tiges florales;
- autres cultures – la feuille la plus récemment arrivée à maturité et complètement étalée.

Tableau 3-9. Lignes directrices relatives à l'analyse des tissus

Plante	Azote (%)	Phosphore (%)	Potassium (%)	Calcium (%)	Magnésium (%)	Fer (ppm)	Manganèse (ppm)	Zinc (ppm)	Cuivre (ppm)	Bore (ppm)
Alstroemeria spp.	3,8-7,6	0,3-0,7	3,7-4,8	0,6-1,4	0,2-0,4	175-275	60-90	35-70	5-15	10-50
Azalée	2,2-2,8	0,2-0,5	0,7-1,6	0,2-1,6	0,1-0,6	50-150	30-300	5-60	5-15	15-100
Bégonia multiflora	4,4-5,2	0,3-0,4	3,4-4,2	1,3-2,1	0,6-1,0	100-260	90-355	50-65	10-15	30-40
Bégonia Rieger	3,4-4,6	0,4-0,8	2,0-3,5	0,7-2,4	0,3-0,8	80-390	35-190	20-30	5-10	35-130
Cactus de Noël (Schlumbergera)	2,7-3,7	0,5-0,9	6,2-7,1	0,7-0,9	1,6-2,2	105-110	35-130	50-65	10-15	65-70
Caladium	3,6-4,9	0,4-0,7	2,3-4,1	1,1-1,6	0,1-0,3	65-90	110-135	125-135	5-10	95-145
Calla	2,9-3,0	0,3-0,4	3,9-4,4	0,9-1,1	0,3-0,4	95-130	635-690	30-45	5-10	30-40
Chrysanthème	4,0-6,0	0,2-1,2	1,0-10,0	0,5-4,6	0,1-1,5	20-750	25-375	5-35	5-50	20-200
Dieffenbachia	3,0-4,0	0,7-1,0	6,4-8,2	1,9-2,4	0,4-0,8	50-300	50-300	40-200	3,5-30	10-30
Exacum	3,8-5,3	0,3-0,7	2,3-3,4	0,5-0,8	0,4-0,7	55-155	70-165	25-85	5-75	25-60
Ficus benjamina	2,0-2,5	0,2-0,4	2,1-2,5	1,7-2,5	0,3-0,4	50-200	25-100	20-75	5-10	20-40
Freesia	2,7-5,6	0,4-1,2	3,1-5,9	0,4-1,0	0,3-1,8	80-115	30-540	40-110	5-130	30-100
Fuchsia	2,8-4,6	0,4-0,6	2,2-2,5	1,6-2,4	0,4-0,7	95-335	75-220	30-45	5-10	25-35
Géranium de semence	3,7-4,8	0,3-0,6	3,3-3,9	1,2-2,1	0,2-0,4	120-340	110-285	35-60	5-15	35-60
Géranium lierre	3,4-4,4	0,4-0,7	2,8-4,7	0,9-1,4	0,2-0,6	115-270	40-175	10-45	5-15	30-280
Gerbera	3,3-4,1	0,3-0,7	3,1-3,9	0,9-4,2	0,3-2,8	80-130	65-260	30-80	5-10	25-50
Gloxinia	3,3-3,8	0,3-0,5	4,5-5,0	1,5-2,2	0,4-0,5	70-150	95-170	20-35	5-20	30-35
Hibiscus	3,5-4,5	0,2-0,6	2,0-2,9	1,9-2,3	0,5-0,7	60-75	135-180	35-50	5-10	20-25
Hortensia	2,0-3,8	0,3-2,5	2,5-6,3	0,8-1,5	0,2-0,4	85-115	100-345	50-105	5-10	35-50
Impatiante commune	4,3-5,3	0,6-0,8	1,8-2,8	2,9-3,3	0,6-0,8	405-685	205-490	65-70	10-15	45-95
Impatiante de Nouvelle-Guinée	3,3-4,9	0,3-0,8	1,9-2,7	1,9-2,7	0,3-0,8	160-890	140-245	40-85	5-10	50-60
Kalanchoe	2,5-5,0	0,2-0,5	2,0-4,8	1,1-4,5	0,4-1,0	75-200	60-250	25-80	5-20	30-60
Lis de Pâques	2,4-4,0	0,1-0,7	2,0-5,0	0,2-4,0	0,3-2,0	100-250	50-250	30-70	5-25	20-50
Muflier	4,0-5,3	0,2-0,6	2,2-4,1	0,5-1,4	0,5-1,0	70-135	60-185	30-55	5-15	15-40
<i>Nephrolepis</i> spp.	1,7-2,5	0,3-0,6	2,5-3,9	0,9-1,3	0,6-0,7	30-300	49-181	52-149	10-15	20-40
Œillet	3,0-5,0	0,1-0,5	2,0-6,0	0,6-2,0	0,2-0,6	30-150	30-445	15-75	5-30	20-400
Pélargonium à feuilles zonées (<i>P. zonale</i>)	3,8-4,4	0,3-0,5	2,6-3,5	1,4-2,0	0,2-0,4	110-580	270-325	50-55	5-15	40-50
Pélargonium à grandes fleurs (<i>P. domesticum</i>)	3,0-3,2	0,3-0,6	1,1-3,1	1,2-2,6	0,3-0,9	120-225	115-475	35-50	5-10	15-45
Pervenche	4,9-5,4	0,4-0,6	2,9-3,6	1,4-1,6	0,4-0,5	95-150	165-300	40-45	5-10	25-40
Pétunia	2,8-5,8	0,5-1,2	3,5-5,5	0,6-4,8	0,3-1,4	40-700	90-185	30-90	5-45	20-50
Poinsettia	4,0-6,0	0,2-1,0	1,5-5,0	0,4-2,0	0,2-1,0	100-300	45-300	25-150	5-15	20-200
Primevère	2,5-3,3	0,4-0,8	2,1-4,2	0,6-1,0	0,2-0,4	75-155	50-80	40-45	5-10	30-35
Rosier	3,0-5,0	0,2-0,3	1,8-3,0	1,0-1,9	0,2-0,4	50-150	30-900	15-50	5-25	20-60
<i>Streptocarpus</i> spp.	2,0-3,5	0,1-0,7	4,8-5,5	1,2-1,9	0,3-0,5	90-260	130-300	85-130	15-20	55-65
Violette africaine	2,2-2,7	0,2-0,9	1,5-6,0	0,6-1,7	0,7-1,1	70-320	35-490	20-80	5-30	30-200

Source : Données colligées par R.E. Widmer, juin 1985. Données augmentées et mises à jour par J.M. Dole et H.F. Wilkins, University of Minnesota, Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, octobre 1988. Valeurs tirées du guide *Values for Nutrient Element Contents of Vegetables and Flowers under Glass*, Glasshouse Crops Research Stations, Aalsmeer and Naaldwijk, 1987.

Symptômes de carence nutritive

(Source : *Diagnosing Nutrient Disorders in Greenhouse Crops*, C. Rosen et J. Erwin, University of Minnesota).

Interactions entre les éléments nutritifs

Les cultures de serre sont souvent sujettes aux troubles nutritionnels pour plusieurs raisons : la rapidité de leur croissance, les besoins différents d'une espèce à l'autre, le volume restreint des racines dans les contenants, la réserve limitée d'éléments nutritifs dans le substrat de culture. Tant la quantité que l'équilibre des éléments nutritifs fournis à la plante jouent un rôle important dans la production de cultures de haute qualité. L'augmentation ou la diminution d'un élément nutritif de la solution peut nuire à l'absorption d'un autre élément nutritif ou à sa migration à l'intérieur de la plante. Bien que les interactions entre les éléments nutritifs puissent être positives ou négatives, ce sont habituellement les interactions négatives qui ont été le mieux étudiées.

Voici les deux situations où l'on doit se préoccuper des interactions entre éléments nutritifs :

- lorsque les concentrations de deux éléments sont à la limite de l'état de carence;
- lorsqu'un élément est en quantité excessive tandis qu'un autre élément est tout juste suffisant.

La nature exacte de l'interaction dépend des éléments nutritifs en jeu et de l'espèce végétale. Elle peut résulter d'une réaction de précipitation dans la solution de sol ou d'une concurrence pendant l'absorption, la migration ou la fonction métabolique des ions (voir le tableau 3-10, *Quelques interactions courantes entre les éléments nutritifs*, ci-contre). Dans bien des cas, le mécanisme de l'interaction n'a pas encore été entièrement élucidé. Ces effets antagonistes prennent de l'ampleur lorsque la concentration d'un élément nutritif est faible relativement à celle de l'élément nutritif ou de l'élément qui peut déclencher l'interaction.

Tableau 3-10. Quelques interactions courantes entre les éléments nutritifs

Une concentration excessive des éléments suivants dans le substrat ou les tissus :	Risque d'entraîner une carence en :
Ammonium	Calcium, molybdène
Nitrate	Potassium
Phosphore	Fer, zinc, cuivre
Potassium	Magnésium, calcium
Calcium	Magnésium, bore
Magnésium	Potassium, calcium
Manganèse	Fer
Fer	Manganèse
Zinc	Manganèse, fer
Cuivre	Manganèse, fer, zinc

Étudier les interactions entre les éléments nutritifs ou antagonismes et le juste équilibre des éléments nutritifs en tenant compte des concentrations disponibles. À la suite de leur absorption et de leur diffusion, les éléments nutritifs peuvent interagir pour supprimer l'activité d'autres éléments en moins grandes concentrations dans les tissus foliaires. Le même phénomène se produit durant l'absorption des éléments nutritifs présents dans la solution fertilisante, surtout quand les teneurs des éléments moins importants frôlent la limite inférieure de la fourchette acceptable et d'autres sont présents en assez grande quantité. L'apport en éléments nutritifs est important étant donné qu'on peut atteindre des ratios optimaux dans les tissus des plantes que lorsque les deux éléments sont présents dans la solution fertilisante.

Comment diagnostiquer un déséquilibre nutritionnel

Il ne faut pas perdre de vue que dès l'instant où des plantes portent des symptômes visibles de déséquilibre nutritionnel, leur qualité marchande peut déjà avoir baissé. Il faut s'astreindre à des programmes d'analyses de sol rigoureux pour détecter tôt les problèmes, avant d'en constater les dégâts.

Dans la plupart des cas, les troubles nutritionnels produisent une séquence de symptômes bien définie qui est caractéristique de l'élément en cause. Généralement, une carence en éléments qui sont mobiles dans la plante se manifeste en premier sur les feuilles les plus vieilles (celles du bas), alors

qu'une carence en éléments immobiles s'extériorise en premier sur les feuilles jeunes (celles du haut). Dans certains cas, les symptômes d'une maladie ou d'une intoxication par un pesticide peuvent ressembler aux symptômes de carence ou de toxicité causés par les éléments nutritifs.

Imaginer la partie aérienne des plantes comme étant constituée de trois régions clés qui sont, de haut en bas : la région 1, le point végétatif et les jeunes feuilles qui se déploient; la région 2, les feuilles nouvellement ou récemment déployées; la région 3, les feuilles les plus vieilles du plant, à partir desquelles la plupart des ramifications latérales se forment.

De plus, les symptômes de déséquilibre nutritionnels sont souvent propres à certaines espèces et à certains cultivars. Des analyses de sol et des tissus peuvent aider à confirmer que les symptômes observés sont liés à un déséquilibre des éléments nutritifs.

Les symptômes de carence et/ou de toxicité dont il sera question dans les paragraphes suivants (en ce qui concerne l'azote, le phosphore, le potassium, le magnésium et le soufre) se manifestent généralement d'abord sur les feuilles inférieures et gagnent les feuilles plus jeunes au fur et à mesure que le problème s'aggrave.

Azote

Carence

- Les feuilles pâlisent et jaunissent.
- Les feuilles les plus vieilles sont les premières touchées, mais dans les cas graves, toute la plante peut jaunir. La plante souffre d'un retard de croissance. Les symptômes ressemblent beaucoup à ceux de la carence en soufre.

Excès d'ammonium

- Rabougrissement du plant.
- Jaunissement des feuilles.
- Nécrose du bord des feuilles.
- Dépérissement du point végétatif.
- Une concentration élevée d'ammonium (généralement pendant les mois d'hiver) nuit à l'absorption et/ou à la diffusion du potassium, du magnésium et du calcium, ce qui entraîne une carence en calcium et une réduction des

concentrations de potassium et de magnésium dans les tissus des plantes.

Excès de nitrates

- La plupart des plantes tolèrent des concentrations élevées de nitrates sans présenter de symptômes.
- Les nitrates améliorent l'absorption du phosphore et du potassium.
- Des concentrations excessives de nitrates stimulent la croissance végétative, ce qui risque de retarder la floraison.

Phosphore

Carence

- Les feuilles prennent une coloration rouge-violet; les feuilles inférieures sont jaunâtres.
- Les feuilles du bas sont les premières touchées; la nécrose et la chute des feuilles sont à craindre si la carence est sévère.
- La croissance ralentit.
- Dans un mélange sans sol, la carence peut être imputable à un pH élevé (> 7,4) ou faible (< 5,0).

Excès

- Peut entraîner des symptômes de carence en oligo-éléments en empêchant l'absorption et/ou la diffusion du fer, du zinc et du cuivre, probablement par suite de la précipitation des phosphates.

Potassium

Carence

- Des taches grises ou ocre apparaissent près du bord des feuilles.
- Les feuilles les plus vieilles sont touchées les premières; elles présentent un roussissement caractéristique de la pointe et du bord des feuilles.
- Chez certains plants, des taches ou chloroses peuvent apparaître entre les nervures.
- La croissance peut être buissonnante.

Excès

- À de très fortes concentrations, peut causer des brûlures par le sel qui se manifestent sur le pourtour des feuilles.

- Si les concentrations de magnésium sont faibles, un excès de potassium entraîne une carence en magnésium.

Magnésium

Carence

- Les feuilles les plus vieilles jaunissent entre les nervures (chlorose internervaire).
- Dans les cas graves, les jeunes feuilles sont également touchées, tandis que les vieilles feuilles peuvent présenter des taches nécrotiques, puis finissent par tomber.
- La carence en magnésium peut être provoquée par des concentrations élevées de potassium.

Excès

- Les plantes peuvent tolérer des concentrations élevées de magnésium sans manifester de symptômes.
- Des concentrations élevées de magnésium peuvent entraîner des carences en potassium et en calcium dans les tissus végétaux.

Soufre

Carence

- Jaunissement généralisé du plant et, souvent, des nervures des feuilles.
- Symptômes similaires à ceux d'une carence en azote.

Excès

- Les plantes peuvent tolérer des concentrations élevées de soufre; par contre, elles absorbent alors moins bien le molybdène.

Les symptômes suivants de carence et/ou de toxicité (en ce qui concerne le calcium, le bore, le cuivre, le fer, le manganèse, le molybdène et le zinc) se manifestent généralement d'abord sur les feuilles les plus jeunes (aux extrémités).

Calcium

Carence

- Dépérissement possible des points végétatifs.
- Symptômes présents d'abord sur les feuilles les plus jeunes.

- Dépérissement des extrémités des racines; ralentissement de la croissance racinaire.
- Chez certains plants, les bords ou les pointes des feuilles jaunissent ou prennent un aspect brûlé.
- De fortes concentrations d'ammonium et des conditions de croissance excessivement humides ou sèches peuvent entraîner une carence en calcium.

Excès

- Les plantes peuvent tolérer des concentrations élevées de calcium sans présenter de symptômes.
- Des teneurs élevées en calcium peuvent abaisser les concentrations de potassium et de magnésium dans les tissus des plantes.

Bore

Carence

- Les carences se manifestent habituellement sur les tissus les plus jeunes (région 1).
- Les jeunes feuilles sont souvent vert foncé, épaisses et cassantes.
- Les points végétatifs meurent et les feuilles paraissent petites et difformes; il se forme des tiges multiples. Sur les rosiers, apparaît souvent un balai de sorcière.

Excès

- Peut être extrêmement toxique pour certaines plantes.
- Se traduit habituellement par une chlorose suivie d'une nécrose ou du roussissement des bords des vieilles feuilles (région 3) entre les nervures.

Cuivre

Carence

- Jaunissement ou dépérissement des jeunes feuilles (région 1).
- Jaunissement occasionnel du limbe entre les nervures.
- Les feuilles se développent mal, s'allongent, mais restent étroites.
- Des concentrations élevées de phosphore peuvent provoquer une carence en cuivre.

Excès

- Peut conduire à une carence en fer et nuire à la croissance du système racinaire.

Fer

Carence

- Jaunissement du limbe entre les nervures des feuilles les plus jeunes (région 1), tandis que les nervures restent vertes (chlorose internervaire); les feuilles peuvent aussi virer entièrement au jaune ou au blanc et se nécroser.
- Des concentrations élevées de phosphore peuvent provoquer une carence en fer.
- Une mauvaise oxygénation consécutive à un arrosage trop abondant induit une chlorose ferrique.
- Une carence en fer se manifeste quand le pH est trop élevé ou que le sol est trop froid. Quand la carence est causée par un pH élevé, il est recommandé d'utiliser un chélate de fer EDDHA (le plus puissant pour la fourchette de pH la plus étendue) pour corriger les symptômes de carence en fer.

Excès

- La plupart des plantes peuvent tolérer des concentrations élevées de fer sans en souffrir.
- Les taches chlorotiques finissent par devenir brun rougeâtre ou noires et les tissus malades par se détacher (région 3).
- Des concentrations élevées de fer peuvent provoquer une carence en magnésium chez certaines plantes.

Manganèse

Carence

- Mêmes symptômes que pour une carence en fer.
- Jaunissement du limbe entre les nervures des feuilles les plus jeunes; habituellement, les feuilles ne présentent pas de taches blanches ni de nécroses.
- En général, seules les nervures principales restent vertes, ce qui donne à la feuille l'allure d'une arête de poisson.
- La carence en manganèse se manifeste lorsque le sol est trop froid et/ou a un pH trop élevé.

Excès

- Apparition de taches brun rougeâtre ou noires entre les nervures des feuilles du bas (région 3); jaunissement des feuilles.
- L'excès de manganèse se produit quand le pH est faible.

Molybdène

Carence

- Les jeunes feuilles à maturité pâlisent, se déforment et deviennent étroites et filiformes.
- Les jeunes feuilles à maturité peuvent présenter des symptômes de chlorose internervaire et d'enroulement des bords; tôt ou tard, le tissu jaunissant se nécrose (région 2).
- Chez certains plants, le bord des feuilles est roussi.
- Les symptômes se manifestent le plus souvent dans des conditions de faible pH.
- L'absorption du molybdène est favorisée par le phosphore et le magnésium, alors qu'elle est freinée par une concentration élevée de soufre.

Excès

- Les plantes peuvent tolérer des teneurs élevées en molybdène sans que des symptômes se manifestent.

Zinc

Carence

- Les feuilles les plus jeunes sont affectées les premières et peuvent présenter des signes de jaunissement internervaire.
- D'autres symptômes sont possibles, dont des entrenœuds courts et des feuilles en rosette.
- Des niveaux élevés de phosphore peuvent amener une carence en zinc.
- La carence en zinc se manifeste dans des conditions de pH élevé.

Excès

- Peut, chez certaines plantes, nuire à l'absorption du phosphore et du fer.
- Survient sous des pH faibles.
- Nuit à la croissance des racines et au développement des feuilles.

Figure 3–1. Clé de diagnostic des troubles nutritionnels chez les plantes de serre



