



Guide de production

des cultures

de fruits et de légumes en serre

Le présent guide est publié à titre informatif seulement. La province de l'Ontario, représentée par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de l'Agroentreprise (MAAAO), ne fait aucune garantie expresse ou tacite en lien avec l'utilisation de ce guide, à savoir son contenu ainsi que tout lien menant à des sources ou des sites de tiers et tout contenu de ces sources et sites, ce qui comprend, sans limitation, les garanties d'absence de contrefaçon ou d'adaptation à un usage particulier.

En aucun cas la province de l'Ontario ou ses dirigeants, ses cadres, son personnel, ses fonctionnaires ou ses mandataires ne sauraient assumer la responsabilité, contractuelle, délictuelle ou autre, d'un contenu désuet, d'oublis ou d'erreurs dans le présent guide ou dans les sources ou sur les sites de tiers auxquels le guide renvoie, ni des dommages (ce qui comprend, sans limitation, les pertes agricoles, animales ou financières, les préjudices pour la santé et la sécurité, les conséquences environnementales, les interruptions d'activité, la perte d'information et les dommages directs, indirects, accessoires, particuliers ou punitifs) liés, directement ou indirectement, à l'utilisation ou à l'inutilisabilité du présent guide (soit l'ensemble de son contenu), de

tout lien ou des sites et travaux de tiers. Il incombe à l'utilisateur d'adopter la meilleure conduite quant à sa situation particulière.

Le contenu du présent guide (y compris, sans limitation, les images, les icônes et son apparence globale) est la propriété de la province de l'Ontario. La province ne cède aucun de ses droits exclusifs relativement au présent guide, ce qui comprend, sans limitation, les droits d'auteur, les marques de commerce et les autres droits de propriété intellectuelle.

En aucun cas l'utilisateur ne peut, de quelque façon que ce soit, vendre, publier à nouveau, imprimer, télécharger, copier, reproduire, modifier, téléverser, publier sur un média social, transmettre ou distribuer le présent guide, en tout ou en partie, sans avoir obtenu au préalable le consentement écrit de la Province, sauf s'il l'imprime, le télécharge ou le copie dans une mesure raisonnable à des fins d'information et d'utilisation personnelles. La mise à disposition de toute partie du présent guide ne constitue en aucun cas une aliénation des droits d'auteur, des marques de commerce et d'autres droits de propriété intellectuelle de la province au profit d'un utilisateur ou d'un tiers.

**Publié par le ministère de l'Agriculture,
de l'Alimentation et de l'Agroentreprise**
© Imprimeur du Roi pour l'Ontario, 2025

ISBN 978-1-4868-8291-5 (imprimée)
ISBN 978-1-4868-8292-2 (PDF)

This publication is also available in English.

P836B-0225-VER-1.0-AODA

Page de couverture: Fruits et légumes cultivés en serre, notamment tomates, poivrons, concombres, laitues, aubergines et fraises.

Couverture arrière: Poivrons cultivés en serre avec éclairage supplémentaire et rideaux thermiques.

Pour obtenir une copie PDF de cette publication, visitez ontario.ca/cultures et effectuez une recherche avec le numéro et le titre de la publication.

Pour commander un exemplaire imprimé de cette publication du MAAAO, visitez ontario.ca/publications. Un nombre limité d'exemplaires imprimés sont disponibles.

Centre d'information agricole
1 877 424-1300 (1 855 696-2811 (ATS) ou
ag.info.omafa@ontario.ca



Guide de production

des cultures

de fruits et de légumes en serre

Publication 836 | Livre B
Guide de production des cultures des fruits et des légumes de serre

Rédacteur en chef et rédacteur technique

Fadi Al-Daoud, spécialiste de la culture des légumes en serre, ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de l'Agroentreprise de l'Ontario (MAAAO)

Rédacteurs techniques

Thomas Graham, professeur adjoint, Université de Guelph

Xiuming Hao, chercheur principal, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Jason Lanoue, biologiste, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Youbin Zheng, professeur, Université de Guelph

Réviseurs techniques

Le rédacteur en chef tient à remercier les partenaires de l'industrie et les personnes suivantes d'avoir révisé cette publication :

Quade Digweed, P. Ing., ingénieur en serres, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Thomas Graham, professeur adjoint, Université de Guelph

Xiuming Hao, chercheur principal, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Jason Lanoue, biologiste, Agriculture et Agroalimentaire Canada

William Lubitz, professeur agrégé, Université de Guelph

Abigail Wiesner, spécialiste intérimaire de la floriculture en serre, MAAAO

Youbin Zheng, professeur, Université de Guelph

Direction artistique et gestion de projet

Andrea Vieira, Nicole Berardi (MAAAO)

Illustrations

Michael Custode

Remerciements

L'éditeur tient à remercier les intervenants suivants dont les photos, le texte ou les données ont été utilisés dans la création de cette publication :

Quade Digweed, P. Ing., ingénieur en serres, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Xiuming Hao, chercheur principal, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Jason Lanoue, biologiste, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Greenhouse Canada

Les renseignements utilisés dans ce guide ont été compilés à partir de plusieurs sources, y compris les publications techniques du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de l'Agroentreprise de l'Ontario.

Cette publication est la deuxième d'une série qui remplacera la publication 836 : La culture des légumes de serre en Ontario, 2010 (archivée)

Table des matières

Présentation	1	Culture sur sol	51
Chapitre 1 : Phases végétative et de fructification	3	Gestion intégrée de la zone racinaire (GIZR)	54
Chapitre 2 : Température	5	Chapitre 9 : Éclairage supplémentaire pour la production hivernal	55
Photosynthèse et respiration	5	Renseignements généraux	55
Gestion de la température	6	Mini-concombres, luminaires à vapeur de SHP au plafond et éclairage d'appoint à DEL	58
Température et croissance des plants	6	Tomates, luminaires à vapeur de SHP et lumière du rouge lointain	60
Température et humidité relative (HR)	7	Poivrons, éclairage à vapeur de SHP et à DEL et rayonnement rouge lointain	61
Chapitre 3 : Lumière	9	Longue photopériode d'éclairage dynamique de faible intensité des tomates, des mini-concombres, des poivrons et des micropousses	61
Transmission et distribution de la lumière	12	Chapitre 10 : Énergie dans les serres	67
Intensité lumineuse et taille des feuilles	14	Chauffage des serres	68
Chapitre 4 : Humidité relative (HR)	15	Refroidissement des serres	69
Déficit de saturation (DS)	16	Capteurs et commandes de température	70
Chapitre 5 : Dioxyde de carbone (CO₂)	21	Chapitre 11 : Culture des plants	73
Qu'est-ce que le CO ₂ ?	21	Semence	73
Enrichissement en CO ₂ et physiologie végétale	21	Semis et germination	74
Enrichissement en CO ₂ et lumière et chaleur élevées	24	Culture des plants	75
L'enrichissement en CO ₂ est-il toujours une bonne idée?	25	Greffage	77
Chapitre 6 : Eau	27	Chapitre 12 : Nutriments et tests d'analyse	79
Chapitre 7 : Recyclage et désinfection de la solution nutritive	31	Analyse de la solution nutritive	79
Filtres membrane	32	Analyses tissulaires et foliaires	80
Filtration lente sur sable et biofiltration	34	Analyses de sol	81
Chaleur (pasteurisation)	36	Glossaire	85
Lumière ultraviolette (UV)	37	Annexes	87
Ozone (O ₃)	38	Annexe A. Ressources ministérielles	87
Filtration et désinfection en plusieurs étapes	39	Annexe B. Autres ressources	88
Chapitre 8 : Milieux de croissance	43	Annexe C. Système métrique et abréviations	89
Culture sur laine de roche	44		
Fibre de coco	47		

Figures

Figure 1	4	une serre à double couche de polyéthylène dans le sud-ouest de l'Ontario en août 2022.
(A) Un plant de tomate de serre équilibré et (B) un plant de tomate de serre en phase végétative.		(C) Illustration de la quantité et de la qualité de la lumière lorsqu'elle pénètre dans la serre et à différentes hauteurs dans la canopée des cultures de vigne.
Figure 2	6	
Profil typique de la température de la serre pour la plupart des cultures maraîchères par temps ensoleillé et nuageux.		
Figure 3	10	
(A) Longueur d'onde et énergie photonique de différents types de lumière le long du spectre lumineux. <i>Source</i> : Encyclopedia Britannica. (B) Influence de la qualité de la lumière sur la croissance des plants.		
Figure 4	11	
(A) Heures d'ensoleillement — moyenne sur 75 ans (B) Rayonnement global (mesure de l'énergie solaire entre 200 et 2 800 nm) — Moyenne hebdomadaire et (C) Rayonnement global — moyenne sur 10 ans.		
Figure 5	11	
(A) Puissance lumineuse totale et (B) PPFd représentant l'intensité lumineuse et la qualité de la lumière solaire extérieure à Windsor-Essex en mi-journée les jours ensoleillés et nuageux de l'été et de l'automne 2022.		
Figure 6	12	
Puissance totale, (B) PPFd et (C) Ratios de couleurs claires représentant l'intensité lumineuse et la qualité de la lumière du soleil extérieure à Windsor-Essex en mi-journée par temps ensoleillé et nuageux en été et en automne 2022.		
Figure 7	12	
(A) Profil d'une serre moderne avec des gouttières élevées et un faite. (A) Profil du toit arrondi d'une serre moderne avec des gouttières élevées.		
Figure 8	13	
Comparaison de la transmission de la lumière entre le verre et deux couches de polyéthylène.		
Figure 9	13	
(A) Quantité et (B) qualité de la lumière à l'extérieur et à différentes hauteurs dans la canopée des tomates et des aubergines dans		
Figure 10	14	
Le verre diffus permet à plus de lumière d'atteindre les niveaux inférieurs de la canopée d'une culture de poivron par rapport au verre ordinaire.		
Figure 11	22	
Chaudière au gaz naturel (partie inférieure) avec épurateur de gaz de combustion (partie supérieure) pour fournir de la chaleur et du CO ₂ pour la production de légumes de serre.		
Figure 12	24	
Plants de tomates pendant les journées lumineuses et chaudes d'août 2005, en Ontario cultivés sous (A) les niveaux de CO ₂ ambiants et (B) l'enrichissement en CO ₂ . Les cercles rouges indiquent un développement foliaire normal en présence du CO ₂ ambiant et polyphyllie sous enrichissement en CO ₂ .		
Figure 13	27	
Application d'eau dans les légumes de serre.		
Figure 14	27	
Étang d'irrigation de serre.		
Figure 15	32	
Schéma du système de recyclage de la solution nutritive.		
Figure 16	33	
Système de filtration par osmose inverse.		
Figure 17	34	
(A) Schéma du système de filtration lente sur sable. (B) Système de filtration lente sur substrat de roches volcaniques.		
Figure 18	35	
Bioréacteur moderne.		
Figure 19	36	
Système de désinfection thermique (pasteurisation) (à gauche) et réservoirs d'eau propre et sale (à droite).		

Figure 20	37	Figure 34.....	65
Système de désinfection à rayons UV.		Empilage des fruits dans les poivriers à	
Figure 21.....	38	entre-nœuds courts. <i>Source</i> : Agriculture et	
Système de désinfection à l'ozone.		Agroalimentaire Canada.	
Figure 22.....	40	Figure 35.....	65
Filtration et désinfection multi-étapes de l'eau		Recettes des essais d'utilisation de la lumière	
recirculée.		dynamique pendant 24 heures sur les cultures	
Figure 23.....	45	de micropousses.	
Système de rigoles surélevées.		Figure 36.....	
Figure 24.....	48	Réservoirs de stockage d'eau chaude.	
Technique de culture sur film nutritif.		Figure 37.....	69
Figure 25.....	50	Passage de tuyaux au niveau des fruits à	
Exemple de disposition pour les goutteurs		maturité.	
pour la technique de culture sur film nutritif et		Figure 38.....	75
conduite de retour.		Installation pour la germination de semences.	
Figure 26.....	56	Figure 39.....	76
Distribution de la lumière supplémentaire.		Production des plants.	
Figure 27.....	58	Figure 40.....	78
Éclairage d'appoint à DEL pour les mini		(A) Porte-greffe prêt pour la greffe, (B) porte-	
concombres.		greffe avec le dessus retiré. (C) Porte-greffe	
Figure 28.....	60	avec pince ajoutée, (D) Greffon placé dans la	
Plants de tomates sous lampes à vapeurs		pince, (E) Greffe finie surmontée d'une feuille de	
de SHP.		cotylédon (F) Greffe finie avec deux tiges prêtes	
Figure 29.....	61	à transplanter.	
Plants de poivrons à entre-nœuds courts.		Figure 41.....	78
Figure 30.....	62	Greffage supérieur japonais.	
Feuilles de tomate avec lésions		Figure 42.....	80
photopériodiques.		Comparaison des nutriments immobiles (à	
Figure 31.....	62	gauche) et des nutriments mobiles (à droite).	
Recettes des essais d'utilisation de la lumière			
dynamique pendant 24 heures sur les cultures			
de tomates.			
Figure 32.....	63		
Recettes des essais d'utilisation de la lumière			
dynamique pendant 24 heures sur les cultures			
de mini-concombres.			
Figure 33.....	64		
Éclairage dynamique et rayonnement rouge			
lointain sur les cultures de poivrons. Recettes			
des essais de l'expérience 1 (A) et de			
l'expérience 2 (B).			

Tableaux

Tableau 1. Tableau de conversion pour la lumière.	10	Tableau 14. Consommation d'énergie typique des luminaires pour atteindre 220 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ de rayonnement photosynthétiquement actif (RPA)	56
Tableau 2. Teneur en eau de l'air à différents niveaux d'humidité (à 18°C)	15	Tableau 15. Installation d'un éclairage supplémentaire dans la production de légumes de serre en hiver	58
Tableau 3. Effet de la température sur la capacité de rétention d'eau de l'air.	15	Tableau 16. Recettes des essais d'éclairage sur les mini-concombres avec luminaires à vapeur de SHP au plafond et éclairage d'appoint à DEL	59
Tableau 4. Effet de la température sur l'humidité relative, la capacité de rétention d'eau de l'air et le déficit de vapeur	16	Tableau 17. Recettes des essais d'éclairage sur les tomates avec luminaires à vapeur de SHP au plafond et éclairage d'appoint à DEL	60
Tableau 5. Valeurs du DS à différentes températures de l'air et à différents niveaux d'HR lorsque la température des feuilles est égale à la température de l'air	18	Tableau 18. Recettes des essais d'éclairage sur les poivrons avec luminaires à vapeur de SHP, éclairage à DEL et rayonnement rouge lointain	61
Tableau 6. Valeurs du DS à différentes températures de l'air et à différents niveaux d'HR lorsque la température des feuilles est 1°C supérieure à la température de l'air	18	Tableau 19. Couleur, intensité et DLI de la lumière diurne/nocturne pour les programmes d'éclairage de 16 et de 24 heures sur les poivrons	64
Tableau 7. Valeurs du DS à différentes températures de l'air et à différents niveaux d'HR lorsque la température des feuilles est 2°C supérieure à la température de l'air	19	Tableau 20. Exigences relatives aux semences et température idéale du milieu de germination.	74
Tableau 8. Valeurs du DS à différentes températures de l'air et à différents niveaux d'HR lorsque la température des feuilles est 1°C inférieure à la température de l'air	19	Tableau 21. Directives d'analyse des substrats utilisés dans les serres par la méthode des extraits boueux.	81
Tableau 9. Valeurs du DS à différentes températures de l'air et à différents niveaux d'HR lorsque la température des feuilles est 2°C inférieure à la température de l'air	20	Tableau 22. Guide de la teneur en nutriments des tissus foliaires des légumes et des fruits de serre	82
Tableau 10. Classes de qualité de l'eau en fonction de la teneur en sel	29	Tableau 23. Fonction et mobilité des nutriments et symptômes de carence et de toxicité	83
Tableau 11. Caractéristiques recommandées pour l'eau de source	29		
Tableau 12. Gamme de taille des micro-organismes et des pores des filtres membrane	33		
Tableau 13. Temps et température requis pour détruire les mauvaises herbes, les ravageurs et les organismes pathogènes.	52		



PRESENTATION

Ce livre est la partie B d'une série qui remplacera la publication 836 : La culture des légumes de serre en Ontario. Visitez ontario.ca/cultures pour plus de renseignements.

Cette publication donne un aperçu des principaux concepts pour la production de fruits et de légumes de serre en Ontario. Ces renseignements sont destinés à être utilisés comme guide pour les producteurs et dans le cadre du cours sur la culture de légumes en serre (Greenhouse Vegetable Course). Des guides de production spécifiques aux cultures suivront. Visitez le blogue ONGreenhouseVegetables.ca pour obtenir des nouvelles et des renseignements supplémentaires sur le cours sur la culture de légumes en serre.

La gestion et le contrôle appropriés de l'environnement de culture sont nécessaires à la croissance optimale des plants et à la maximisation du rendement des cultures de fruits en serre. La production en serre est considérée comme un type d'agriculture en environnement contrôlé (AEC), car de nombreux facteurs peuvent être maîtrisés dans les serres de haute technologie d'aujourd'hui. Les facteurs discutés dans ce livre comprennent la

température, l'irrigation, l'humidité relative, le dioxyde de carbone (CO₂) et l'éclairage.

La croissance des plants peut être contrôlée en manipulant l'environnement d'une serre. Cependant, on recommande d'effectuer une analyse coûts-avantages avant de mettre en œuvre tout changement afin de minimiser les coûts des intrants et le gaspillage tout en maximisant le rendement et la qualité des fruits. Par exemple, les coûts et les avantages de l'installation d'un éclairage supplémentaire doivent être calculés pour s'assurer qu'il est économiquement durable. Il s'agit de calculer et de comparer les coûts d'investissement et d'exploitation par rapport aux augmentations anticipées de la production. La plupart des exploitants de serres effectuent des tests à petite échelle de nouvelles technologies dans une section de leur serre avant de les mettre en œuvre à plus grande échelle dans l'ensemble de leur exploitation. Ces tests devraient durer au moins une saison de croissance pour recueillir suffisamment de données sur les coûts des intrants et le rendement et pour pouvoir comparer ces chiffres avec les saisons précédentes.



CHAPITRE 1

Phases végétative et de fructification

Le présent chapitre traite de certains facteurs de croissance reliés à la production en serre et de leur influence sur la croissance végétative et générative (fructification).

En jouant sur la lumière, la température, les apports d'eau et d'éléments nutritifs, les producteurs peuvent faire passer les plants de la phase végétative à la phase de fructification et vice versa de manière à s'assurer d'obtenir des plants ayant la forme ou l'aspect recherché.

Un plant en phase **végétative** produit plus de feuilles que de fleurs et de fruits. Le plant affiche alors :

- de grosses feuilles épaisses et vert foncé et une tige robuste ayant une teinte vert pâle au point végétatif;
- des fleurs grosses et mal formées poussant sur des tiges florales et des grappes rachitiques;
- des fruits petits relativement à la taille du plant;
- un enracinement important.

En revanche, un plant en phase **générative** présente :

- des feuilles plus petites et une tige mince teintée de mauve au point de croissance;
- des fleurs plus petites et plus nombreuses bien en évidence;
- des fruits de gros calibre par comparaison à la taille du plant;
- des fruits dont la qualité peut laisser à désirer en raison d'une surexposition au soleil.

L'idéal est d'avoir un plant bien équilibré entre les phases de croissance végétative et générative (Figure 1).

Au début du cycle de plantation, les plants ont tendance à être en phase de croissance végétative. Un plant démarré au début de l'hiver lorsque le rayonnement est à son plus bas et que les températures sont fraîches et l'humidité élevée aura tendance à afficher une croissance végétative s'il reçoit des apports abondants d'eau et d'éléments nutritifs. En augmentant la température et en abaissant le niveau d'humidité et la quantité d'eau, on obtiendra un plant dont la croissance sera mieux maîtrisée.

Après la phase initiale de croissance végétative des cultures maraîchères, des stratégies doivent être mises en œuvre pour obtenir un plant génératif qui produira des fruits au moment souhaité. Cependant, il arrive que les plants se mettent à produire trop de fruits; il faut alors recourir aux pratiques culturales qui encouragent la croissance végétative. On peut aussi intervenir dans la croissance du plant en jouant sur l'écart entre les températures diurnes et nocturnes.



Figure 1. (A) Un plant de tomate de serre équilibré et (B) un plant de tomate de serre en phase végétative.



CHAPITRE 2

Température

La température influence plusieurs processus importants qui affectent la croissance : la photosynthèse et la respiration, la fonction stomatique, le développement des plants et l'humidité relative.

Photosynthèse et respiration

La photosynthèse est le processus par lequel les plants utilisent certaines longueurs d'onde de la lumière pour convertir le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau en glucides et en oxygène. Le plant emmagasine de l'énergie sous forme de glucides. La lumière dont la longueur d'onde se situe entre 400 et 700 nanomètres (nm) est considérée comme le principal **rayonnement photosynthétiquement actif (RPA)** utilisé le plus efficacement par les plants pour la photosynthèse. La photosynthèse est influencée par la quantité de RPA disponible ainsi que par le CO_2 et l'eau, les éléments constitutifs des glucides.

La **respiration** est le processus par lequel les glucides produits par la photosynthèse sont décomposés en présence d'oxygène pour produire de l'énergie (c.-à-d. l'adénosine triphosphate [ATP]). Cette énergie sert alors à

favoriser des processus comme l'amorce et le développement des racines, des feuilles, des bourgeons et des fruits. La respiration peut se produire sur une période de 24 heures et s'effectue en deux volets : la respiration cellulaire et la photorespiration. Les processus exacts de la photorespiration demeurent mal compris, mais la respiration cellulaire peut être influencée par la température.

La croissance des plants est le résultat net de la photosynthèse et de la respiration; elle s'exprime par l'accumulation de biomasse. La température optimale pour l'augmentation de la biomasse dépend de l'intensité lumineuse. Le point de consigne de la température de la serre varie en fonction de l'augmentation des niveaux de lumière au printemps et en été. Cela garantira que le rapport de la température au rayonnement (RTR) est idéal pour une croissance équilibrée des cultures. Plus l'intensité lumineuse est élevée, plus la température optimale doit l'être. Durant les heures d'ensoleillement, une température plus élevée permet aux plants de produire des glucides et de croître rapidement. La nuit, des températures plus basses permettent aux sucres fabriqués pendant la journée d'être transportés et stockés dans les points de croissance de la tige, des racines, des feuilles et des fruits. Les plants

gagnent ainsi en épaisseur et en volume. Dans une serre, l'obtention de plants bien équilibrés qui fournissent un haut rendement passe par un réglage fréquent des températures et la détermination du moment propice où effectuer ces réglages. Pour la plupart des cultures de serre, l'échelle de température optimale se situe entre 12 et 16°C durant les périodes où l'éclairage naturel est le plus faible, et entre 15 et 25°C quand l'intensité lumineuse est forte.

Gestion de la température

La température optimale pour chaque culture dépend des conditions de lumière, du stade de croissance et de la saison. En ajustant les températures dans les serres, les producteurs peuvent contrôler le taux de croissance des cultures, leur vigueur, la forme ou la morphologie des plants, la taille des fruits et, finalement, le rendement. En règle générale, la température optimale sur 24 heures se situe entre 17 et 18°C pour la laitue; à 19°C pour la tomate et le poivron; et à 21°C pour le concombre. La [Figure 2](#) montre un exemple de la différence de température tout au long de la journée par temps ensoleillé et nuageux. Les jours ensoleillés nécessitent généralement un réglage de température plus élevé que les jours nuageux. Les opérateurs de serre manipulent la température pour développer le plant idéal avec une bonne forme et une production de haute qualité en maintenant une moyenne optimale sur 24 heures. La température est généralement augmentée dans l'après-midi pour augmenter la vitesse de croissance et abaissée en début de nuit pour créer une base solide pour les feuilles, les racines et les fruits.

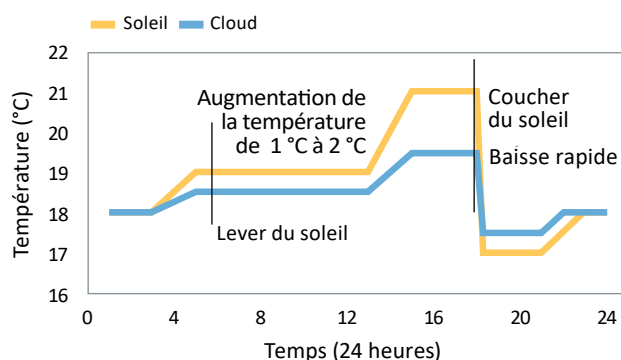


Figure 2. Profil typique de la température de la serre pour la plupart des cultures maraîchères par temps ensoleillé et nuageux.

Température et croissance des plants

La croissance des feuilles, des fleurs et des racines requiert de l'énergie fournie par la respiration qui, à son tour, est influencée par la température. Il y a une augmentation correspondante de 10% de l'initiation des feuilles et des fleurs pour chaque augmentation de degré comprise entre 10°C et 30°C. La température moyenne sur 24 heures détermine non seulement le taux de croissance des cultures, mais elle affecte également l'architecture des plants. À une faible température moyenne sur 24 heures, le plant produit généralement des entre-nœuds plus courts, des tiges et des feuilles plus épaisses, ainsi que de grosses fleurs. À une température moyenne élevée sur 24 heures, le plant produit généralement des entre-nœuds plus longs, des tiges et des feuilles plus minces, et des fleurs fileuses. Il s'agit de viser un compromis entre les deux, car si la température moyenne sur 24 heures est trop élevée, le plant et ses fleurs seront affaiblis, ce qui entraînera une baisse de rendement, tandis que si elle est trop basse, la récolte sera retardée ou les fleurs seront endommagées, ce qui aura pour effet de donner des fruits difformes.

En règle générale, la température moyenne sur 24 heures est plus basse dans des conditions de faible luminosité et plus élevée dans des conditions de forte luminosité. Toutefois, les exploitants de serres doivent également observer les caractéristiques morphologiques du plant pour déterminer comment ajuster la température de la serre. Par exemple, les concombres et la laitue ont des feuilles courtes et larges quand la température est basse en début de croissance, alors que des températures élevées donnent des feuilles longues et étroites. La différence entre les températures de jour et de nuit influence la forme du plant. Une différence faible ou nulle entre les températures de jour et de nuit se traduit par des plants plus végétatifs avec des entre-nœuds courts et des feuilles plus épaisses et plus grandes; tandis qu'une grande différence entre les températures de jour et de nuit se traduit par des plants plus génératifs avec des entre-nœuds plus longs et des feuilles plus minces et plus petites. Les températures diurnes doivent être

maintenues près des températures nocturnes pour encourager l'établissement du plant aux premières étapes de développement des plants dans la serre. Cependant, après les stades de la floraison et de la fructification, une différence de température entre le jour et la nuit doit être appliquée pour produire un plant équilibré.

Température et humidité relative (HR)

La température a une relation inverse avec l'humidité relative (HR). Cela signifie que lorsque la température augmente, l'HR diminue. L'inverse est également vrai : lorsque la température diminue, l'HR augmente. L'humidité relative a également un effet inverse sur le taux de transpiration et, par conséquent, sur l'état hydrique du plant. En général, les plants cultivés dans des environnements où le taux d'HR est élevé auront des feuilles plus grosses et des tiges plus longues que ceux qui poussent dans des environnements à faible HR. Le [chapitre 4, Humidité relative](#) comprend plus de renseignements sur la relation entre la température et l'HR.



CHAPITRE 3

Lumière

La lumière est un rayonnement électromagnétique qui agit à la fois comme une onde et une particule. Les particules de lumière (**photons**) se déplacent de haut en bas comme une onde. La mesure de l'onde d'un photon lumineux peut être mesurée en nanomètres (nm), c'est ce qu'on appelle la **longueur d'onde**. Chaque longueur d'onde est associée à une énergie et à une couleur de lumière différentes. La qualité de la lumière fait référence à la « couleur » de la lumière définie par la longueur d'onde dans laquelle les photons se déplacent. L'énergie et la longueur d'onde ont une relation inverse, ce qui signifie que plus la longueur d'onde est longue, moins elle a d'énergie. Les rayons gamma ont la longueur d'onde la plus courte et le niveau d'énergie le plus élevé, suivis des rayons X et de la lumière ultraviolette (UV) qui ont des longueurs d'onde plus longues et moins d'énergie. La majorité de la lumière utilisée par les plants pour la photosynthèse est connue sous le nom de **rayonnement photosynthétiquement actif (RPA)**, c'est-à-dire une lumière visible pour l'œil humain. La longueur d'onde du RPA (400-700 nm) est plus longue que les rayons UV, mais plus courte que le rayonnement rouge lointain (FR) et le rayonnement infrarouge (IR) (chaleur) (Figure 3).

L'intensité d'une source lumineuse est généralement mesurée en watts par mètre carré (W/m^2) ou en micromoles par mètre carré par seconde ($\mu mol/m^2/sec$). La lumière UV, le RPA, le rayonnement FR et le rayonnement IR peuvent être mesurés en W/m^2 mais seul le RPA est mesuré en $\mu mol/m^2/sec$. L'intensité du RPA est également connue sous le nom de **densité de flux photonique photosynthétique (PPFD)**. Les unités de mesure employées pour exprimer l'intensité lumineuse varient selon les systèmes de commande et le matériel qui sont utilisés. Le [Tableau 1](#) montre les facteurs utilisés pour convertir entre différentes unités lumineuses.

Le RPA est divisé en trois longueurs d'onde principales représentées par leur couleur lumineuse telle que perçue par l'œil humain : la lumière bleue (400-500 nm); la lumière verte, jaune et ambre (500-600 nm); et la lumière rouge (600-700 nm). La quantité de ces couleurs et le rapport d'une couleur à l'autre affectent la physiologie des plants (Figure 3B). La photosynthèse utilise l'énergie du RPA pour combiner l'eau et le CO_2 pour produire des sucres.

Les serres sont conçues et aménagées pour maximiser la quantité de lumière qui entre. Cette configuration est bénéfique pendant les mois d'hiver lorsque les niveaux de lumière

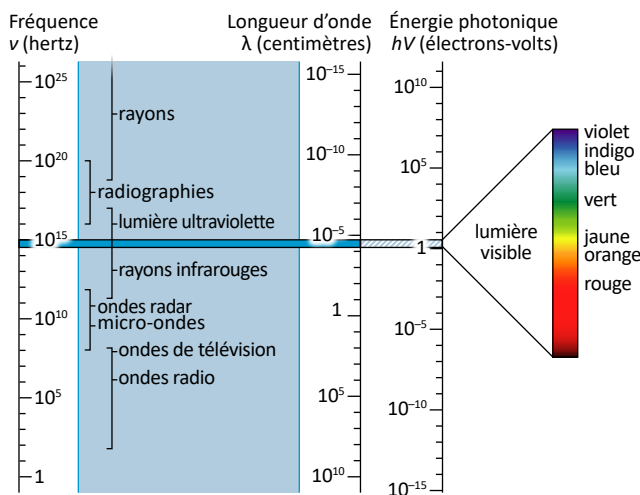


Figure 3A

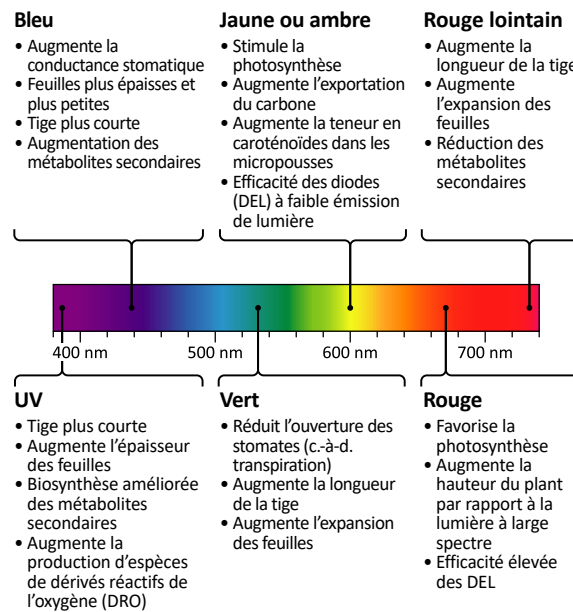


Figure 3B

Figure 3. (A) Longueur d'onde et énergie photonique de différents types de lumière le long du spectre lumineux. *Source* : Encyclopedia Britannica. (B) Influence de la qualité de la lumière sur la croissance des plantes.

Tableau 1. Tableau de conversion pour la lumière

Source lumineuse	W/m ² à μmol/m ² /sec	μmol/m ² /sec à W/m ²	lux à μmol/m ² /sec	Mmol/m ² /sec ² /sec à lux	lux à W/m ²
Lumière du soleil	4,57	0,22	0,02	54,00	0,004
Sodium à haute pression (SON/T)	4,98	0,20	0,01	82,00	0,002
Incandescente	5,00	0,20	0,02	50,00	0,004
Mercure à haute pression	4,52	0,22	0,01	84,00	0,003
Halogénures	4,59	0,22	0,01	71,00	0,003

W/m² = watts/mètre carré

μmol/m²/sec = micromoles/mètre carré/seconde

Source : Thimijan et Heins, 1985. HortScience 18 : 818-822.

du soleil sont trop faibles pour soutenir une production complète, mais parfois il y a trop de lumière du soleil en été, ce qui entraîne des températures élevées qui sont nocives pour les plantes. L'éclairage artificiel supplémentaire peut être utilisé pour stimuler la photosynthèse pendant les mois de faible luminosité. Pendant l'été, des rideaux d'ombre et des revêtements de serre peuvent être utilisés pour diminuer la transmission de la lumière et réduire la charge thermique dans la serre. Cette section traite de la lumière naturelle, mais vous pouvez trouver plus d'informations sur l'éclairage supplémentaire dans le [chapitre 9, Éclairage supplémentaire pour la production hivernale](#).

Le sud-ouest de l'Ontario est la partie la plus méridionale du Canada. Par conséquent, il reçoit le plus de lumière du soleil au cours de l'année. La durée du jour, les heures d'ensoleillement, la quantité de soleil et d'énergie sont faibles au début de l'hiver, mais augmentent au printemps et atteignent leur maximum en été, avant de diminuer à l'automne (Figure 4). Comme il y a relativement peu d'énergie lumineuse disponible pour la croissance au milieu de l'hiver comparativement à l'été, il faut souvent le double du temps pour obtenir le même niveau de croissance en janvier qu'en mai.

Il faut tenir compte de cette réalité quand on établit le calendrier de production des fruits et des légumes de serre. Les méthodes d'exploitation des serres, y compris les ajustements journaliers et saisonniers des températures et des éléments nutritifs, doivent tenir compte des conditions actuelles de lumière.

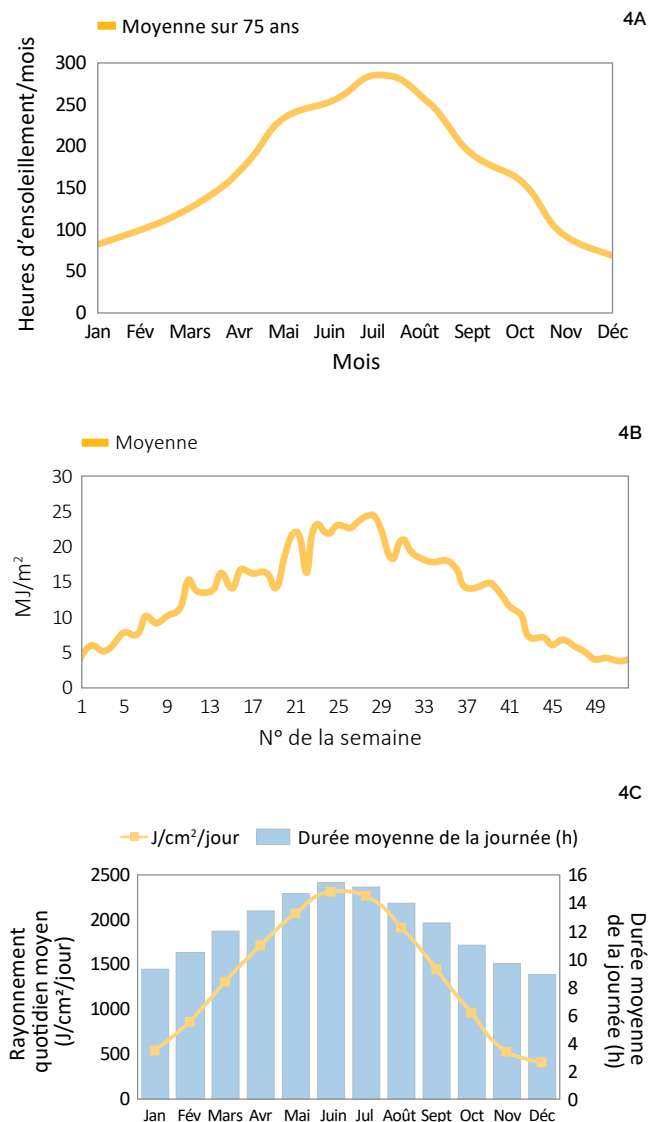


Figure 4. (A) Heures d'ensoleillement — moyenne sur 75 ans (B) Rayonnement global (mesure de l'énergie solaire entre 200 et 2 800 nm) — Moyenne hebdomadaire et (C) Rayonnement global — moyenne sur 10 ans. Source : (A-B) Centre de recherche et de développement de Harrow, (C) Centre de recherche et de développement de Vineland.

La quantité de lumière change non seulement avec les saisons, mais aussi selon la météo. Par exemple, certains jours nuageux peuvent avoir aussi peu que 25 % de la lumière d'une journée ensoleillée. La qualité de la lumière peut également varier entre les jours ensoleillés et les jours nuageux en fonction du type de nuages traversés par la lumière (Figure 5) (Figure 6).

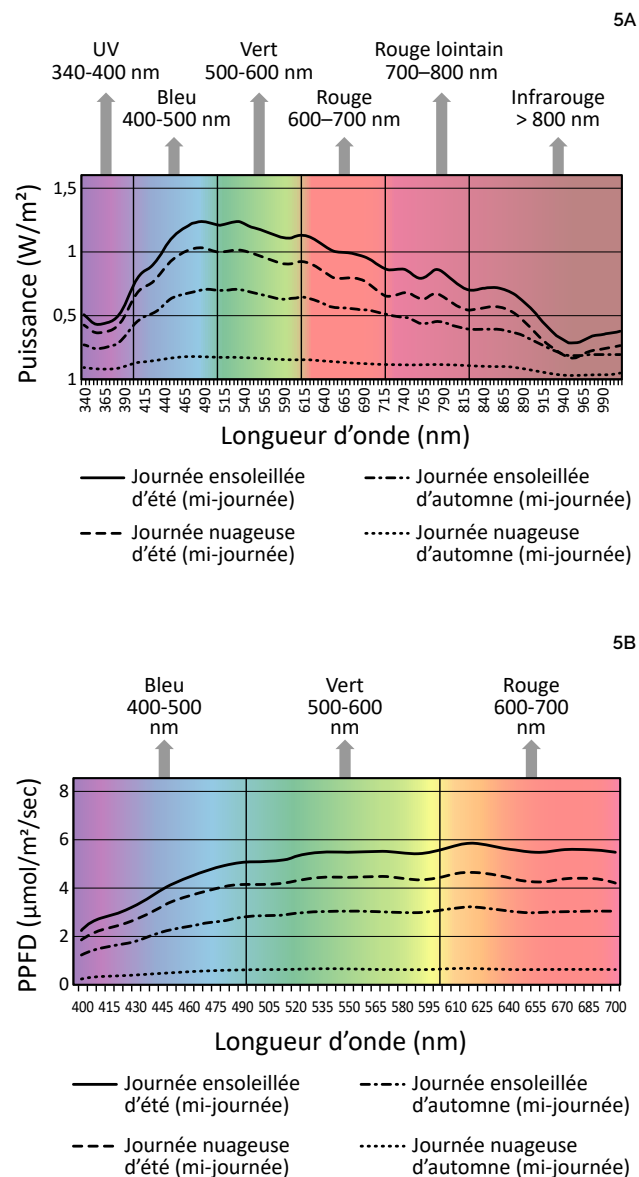


Figure 5. (A) Puissance lumineuse totale et (B) PPFD représentant l'intensité lumineuse et la qualité de la lumière solaire extérieure à Windsor-Essex en mi-journée les jours ensoleillés et nuageux de l'été et de l'automne 2022.

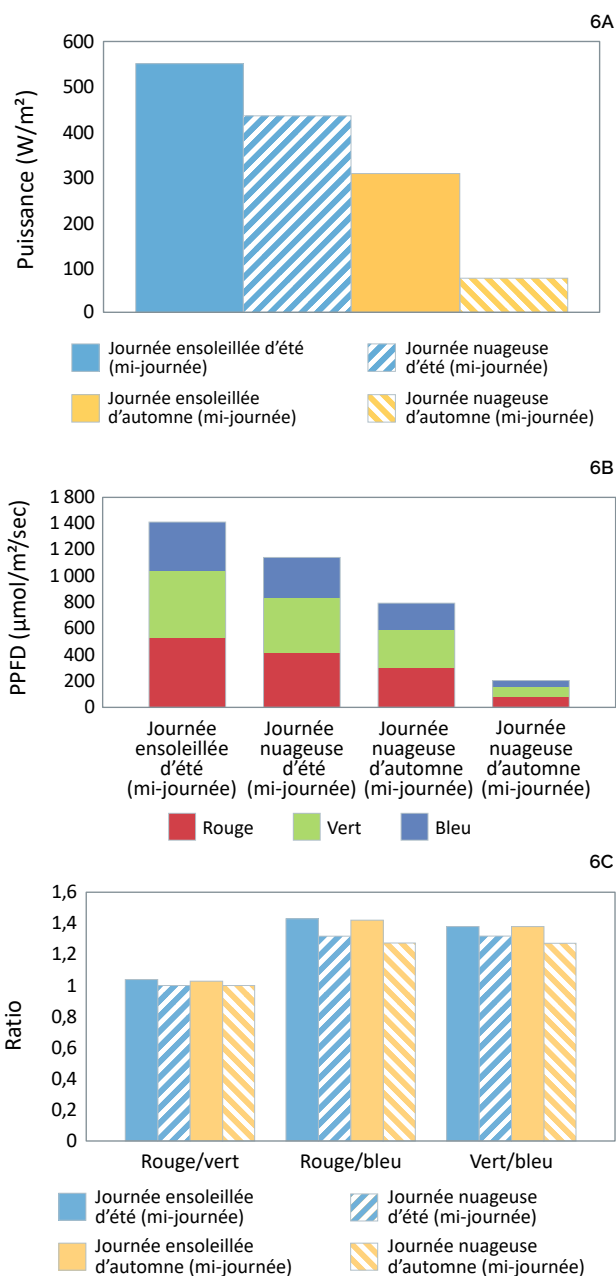


Figure 6. Puissance totale, (B) PPFD et (C) Ratios de couleurs claires représentant l'intensité lumineuse et la qualité de la lumière du soleil extérieure à Windsor-Essex en mi-journée par temps ensoleillé et nuageux en été et en automne 2022.

Transmission et distribution de la lumière

La conception actuelle des toits des serres et la hauteur accrue des gouttières ont permis une meilleure transmission de la lumière et facilité la gestion des paramètres environnementaux et des conditions de croissance dans les serres (Figure 7). Le matériau utilisé comme revêtement de la serre affecte considérablement

le taux de luminosité général dans la serre. Les serres de l'Ontario utilisent principalement une seule couche de verre ou deux couches de polyéthylène (plastique) comme revêtement. Le verre a un niveau plus élevé de transmissibilité de la lumière (il laisse entrer plus de lumière) tandis qu'un revêtement à double couche de polyéthylène est meilleur pour la rétention de chaleur. Les revêtements à double ou à triple couches de polyéthylène combinent la conservation de l'énergie et de faibles coûts de construction sans perte de productivité.



Figure 7. (A) Profil d'une serre moderne avec des gouttières élevées et un faîte. (B) Profil du toit arrondi d'une serre moderne avec des gouttières élevées.

La lumière est réfléchiée, absorbée et transmise lorsqu'elle touche une surface. Les propriétés de réflexion et d'absorption de la lumière d'un vitrage de serre déterminent la quantité de lumière qui est transmise à travers lui. Des calculs théoriques ont montré que pour le verre, environ 4 % de la lumière est réfléchiée à chaque interface air-revêtement. Cela signifie que la transmission lumineuse maximale pour une seule couche de matériau est d'environ 92 % (1 couche avec 4 % à chaque échange de surface = 8 %). Par contraste, la transmission théorique maximale à travers une double couche de verre est de 84 % (2 couches avec 4 % de lumière réfléchiée à chaque interface = 16 %), ce qui indique que la perte de lumière la plus importante est attribuable à la réflexion et non à l'absorption. Ce phénomène explique pourquoi la

transmission de lumière à travers un revêtement à double épaisseur est considérablement moindre qu'à travers une seule couche de revêtement du même matériau, même lorsque l'épaisseur de la couche unique correspond à l'épaisseur totale des deux couches (Figure 8).

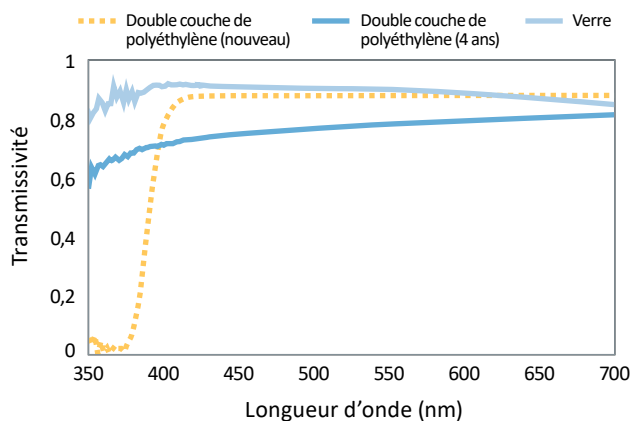


Figure 8. Comparaison de la transmission de la lumière entre le verre et deux couches de polyéthylène..

On comprend ainsi pourquoi la différence dans la transmission de lumière est faible entre des couches de polyéthylène de 100 et de 150 microns (μm). En outre, la recherche et le développement d'additifs pour la production de films en polyéthylène ont augmenté les propriétés de transmission de la lumière des nouveaux plastiques, améliorant la quantité et la qualité de la lumière atteignant les plants. Cela a également permis d'ajuster la transmission des rayons UV pour diminuer l'incidence des maladies (les recherches montrent que certaines longueurs d'onde UV augmentent l'incidence du Botrytis) et permettre aux bourdons de fonctionner dans des serres à double couche de polyéthylène.

Il faut garder à l'esprit toutefois que de nombreux rapports contradictoires ont été publiés sur la transmission de la lumière par différents matériaux. L'emploi de méthodes de mesure différentes explique habituellement les écarts observés. En règle générale, seulement 50 à 75 % de la lumière rejoignant la surface extérieure de la serre atteint réellement la plante. Ce taux peut varier selon la période de l'année et si un revêtement a été appliqué à l'extérieur de la serre en été. Ensuite, après son entrée dans la serre, seule une fraction de la lumière qui atteint le sommet de la canopée parvient à atteindre les niveaux inférieurs des cultures de vigne (Figure 9).

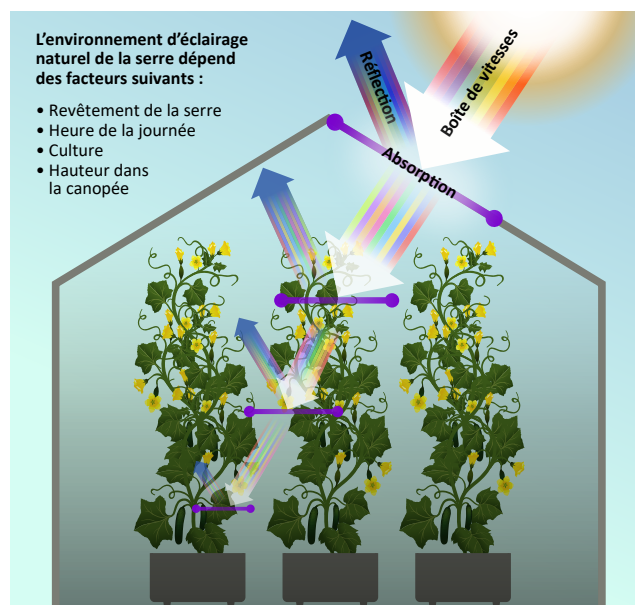
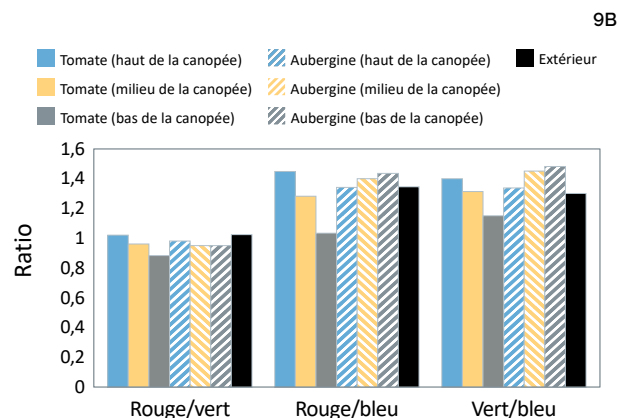
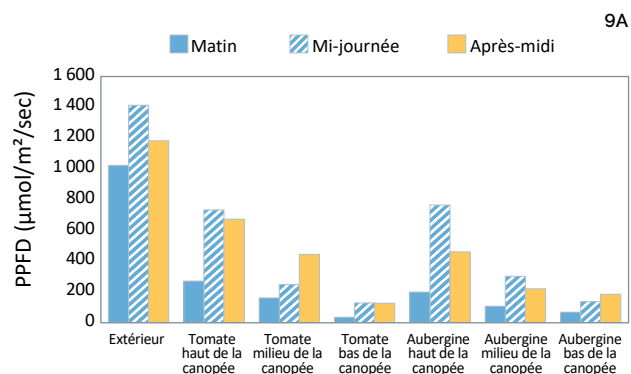


Figure 9. (A) Quantité et (B) qualité de la lumière à l'extérieur et à différentes hauteurs dans la canopée des tomates et des aubergines dans une serre à double couche de polyéthylène dans le sud-ouest de l'Ontario en août 2022. (C) Illustration de la quantité et de la qualité de la lumière lorsqu'elle pénètre dans la serre et à différentes hauteurs dans la canopée des cultures de vigne.

La distribution de la lumière à différentes hauteurs dans la canopée des cultures de vigne peut être améliorée en utilisant des revêtements en verre ou en plastique avec des propriétés de diffusion accrues. Le matériau de couverture diffusé sans revêtement antireflet réduira la quantité de lumière entrant dans la serre, mais la lumière diffusée atteindra les feuilles inférieures en augmentant leurs capacités de photosynthèse (Figure 10). On obtient ainsi un microclimat plus uniforme aux différents niveaux de la canopée, une serre légèrement plus fraîche en raison de la transpiration accrue (mouvement de la vapeur d'eau de la feuille dans l'atmosphère qui se produit à travers des stomates ouverts) et une production améliorée. Les fabricants de verre ont développé du verre avec différents taux de diffusion. Les revêtements en plastique, de par leur nature, ont des propriétés de transmission de la lumière diffuse plus élevées. Les matériaux de revêtement peuvent être appliqués à l'extérieur des serres pour augmenter la diffusion de la lumière. La fermeture d'un rideau d'ombre diffuse peut également être utilisée afin de fournir un peu d'ombre à la culture et d'améliorer la quantité de lumière diffuse.

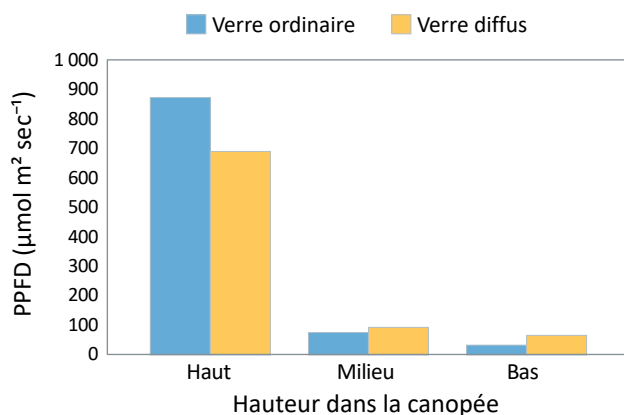


Figure 10. Le verre diffus permet à plus de lumière d'atteindre les niveaux inférieurs de la canopée d'une culture de poivron par rapport au verre ordinaire

Intensité lumineuse et taille des feuilles

Il y a une interaction manifeste entre la taille de la feuille et l'intensité lumineuse. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des jeunes feuilles en croissance : durant les périodes d'intensité lumineuse réduite, les plants ont tendance à produire de plus grandes feuilles. Ainsi, plus de lumière peut être interceptée, ce qui améliore le taux global d'efficacité de conversion du plant. Ces grandes feuilles sont habituellement minces, ont une cuticule plus mince et sont plus faciles à endommager lorsqu'on les manipule dans le cadre des opérations culturales.

Par comparaison, les feuilles qui ont poussé sous une forte intensité lumineuse ont ordinairement une cuticule plus épaisse. Dans cette configuration, ils peuvent capturer plus d'énergie lumineuse. Toutefois, le degré d'adaptation dépend de l'âge du plant ou des feuilles, et de la longueur de la période d'acclimatation et d'ajustement aux conditions environnementales. Ceci explique en partie pourquoi les plants ayant poussé au printemps sont plus gros que ceux qui ont poussé à l'automne, même s'ils ont profité d'une quantité égale de lumière.



CHAPITRE 4

Humidité relative (HR)

L'**humidité relative (HR)** est le rapport entre la quantité réelle de vapeur d'eau présente dans un volume d'air donné (c.-à-d., humidité absolue) et la quantité maximale de vapeur d'eau qui peut être contenue dans ce volume d'air à une température donnée. L'HR est donnée en pourcentage et varie de 40 à 100 % dans la plupart des serres. Plus l'HR est élevée, plus il y a d'eau dans l'air (Tableau 2). Les lectures indiquées par un thermomètre mouillé et par un thermomètre sec ainsi que les diagrammes psychrométriques fournissent de l'information sur la quantité d'eau présente dans l'air, l'HR et le point de rosée. La plupart des ordinateurs servant à commander les paramètres environnementaux dans la serre fournissent automatiquement cette information.

La quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir augmente avec la température, doublant presque pour chaque augmentation de 10°C de la température (Tableau 3). Cela signifie que la quantité d'eau dans l'air nécessaire pour atteindre 70 % d'HR varie en fonction de la température (Tableau 4). Par exemple, à 20°C avec un taux d'HR à 70 %, l'air ne peut contenir que 12,2 g/m³ d'eau. Par contre, à 30°C avec un taux d'HR de 70 %, l'air peut alors contenir

21,9 g/m³ d'eau. Cette différence affecte la transpiration des plants et la capacité asséchante de l'air.

Tableau 2. Teneur en eau de l'air à différents niveaux d'humidité (à 18°C)

Humidité relative (%)	Teneur en eau (g/m ³)
100	15,7
80	12,6
60	9,4
30	4,7

Le tableau est dérivé de diagrammes psychrométriques.
Source : 2001 ASHRAE Handbook – Fundamentals (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001).

Tableau 3. Effet de la température sur la capacité de rétention d'eau de l'air

Température (°C)	Teneur en eau (g/m ³)
0	4,9
10	9,5
20	17,8
30	31,8

Le tableau est dérivé de diagrammes psychrométriques.
Source : 2001 ASHRAE Handbook – Fundamentals (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001).

Tableau 4. Effet de la température sur l'humidité relative, la capacité de rétention d'eau de l'air et le déficit de vapeur

Température (°C)	HR (%)	Teneur maximale potentielle en eau (g/m ³)	Teneur réelle en eau (g/m ³)	Déficit de vapeur (g/m ³)
20	70	17,6	12,2	5,4
25	70	23,6	16,4	7,2
30	70	31,7	21,9	9,8

Le tableau est dérivé de diagrammes psychrométriques.

Source : 2001 ASHRAE Handbook — Fundamentals (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001).

Ainsi, l'HR diminuera si l'air de la serre est chauffé sans modifier la quantité réelle d'humidité présente. Inversement, le refroidissement de la serre augmentera l'HR. Lorsque différents régimes de température de jour et de nuit sont établis, l'HR changera en conséquence. Par exemple, de nombreux producteurs augmentent la température au lever du soleil d'environ 3°C, abaissant ainsi l'HR de 12 à 18 % et augmentant le taux de transpiration. Le soir, la baisse de température augmente l'HR, nécessitant une certaine ventilation pour éliminer l'humidité et prévenir le développement de maladies.

La règle empirique pour la plupart des conditions de serre veut que l'HR diminue d'environ 4 à 6 % pour chaque degré Celsius d'augmentation de la température.

En outre, lorsque l'air humide atteint son point de saturation, de la condensation se produira sur les surfaces plus froides de la serre. Pendant la journée, les feuilles sont généralement plus chaudes que l'air ambiant. La nuit, la température des feuilles peut descendre de 1°C ou de 2°C en dessous de la température de l'air ambiant en raison de la perte de chaleur rayonnante. Ainsi, si l'HR de la serre est proche de 95 %, la condensation peut se produire sur les surfaces foliaires. Des périodes prolongées d'HR élevée et de condensation favorisent les maladies bactériennes et la germination de nombreuses spores fongiques, comme le Botrytis ou l'oidium. Pour en savoir davantage, consulter la publication 836A : *Lutte intégrée contre les ennemis des cultures de fruits et de légumes en serre*.

Une HR extrêmement faible peut se produire lorsque de grandes quantités d'air sec pénètrent dans la serre par une journée ensoleillée et lumineuse au début de l'année. Le cycle de refroidissement doit être surveillé de près

pendant cette période. Une ventilation trop importante réduit trop rapidement l'HR et peut provoquer la brûlure du feuillage tendre ou l'enroulement des jeunes fruits du concombre, ce qui diminue la qualité et le rendement des fruits.

Des systèmes de brumisation ou de nébulisation qui maintiennent l'humidité relative peuvent être installés pour éviter d'endommager des cultures spécifiques. Pendant l'été, lorsqu'une ventilation forcée est nécessaire, une HR élevée pendant la journée n'est souvent pas un problème, à moins qu'un système de ventilateur et de tapis humide n'ait été installé pour le refroidissement. Cependant, la ventilation ou le chauffage sont souvent nécessaires la nuit pour éviter une HR trop élevée et la condensation sur le feuillage.

Notez que l'HR affecte le transfert de pollen. La pollinisation des tomates nécessite une HR comprise entre 70 et 75 %. Cela permet de libérer correctement le pollen. Après la pollinisation, une HR plus élevée aide le pollen à germer, améliorant la fécondation et augmentant la taille des fruits.

Déficit de saturation (DS)

La vigueur et le taux de croissance des plants peuvent être modifiés en ajustant le **déficit de saturation (DS)**. Le DS est la différence entre la tension de vapeur à l'intérieur et l'air à l'extérieur de la feuille. Plus le DS est élevé, plus le taux de transpiration et de perte d'eau est élevé.

Un DS trop faible entraîne les éléments suivants :

- une faible transpiration;
- des feuilles plus épaisses et plus grandes;
- des tiges épaisses;
- des systèmes racinaires plus faibles;
- des plants plus vulnérables aux infestations de maladies.

Un DS trop élevé entraîne les éléments suivants :

- une transpiration élevée;
- des feuilles plus fines et plus petites;
- des tiges plus minces;
- des systèmes racinaires plus forts.

Les valeurs extrêmes de DS ou les augmentations ou diminutions rapides du DS sont préjudiciables à la croissance des plants, à la qualité des fruits et à la productivité des plants.

Le DS est exprimé en kilopascals (kPa). Il est calculé en soustrayant la tension de vapeur d'eau de l'air (TV_{air}) de la tension de vapeur d'eau de la feuille (TV_{feuille}). La tension de vapeur (TV) est le résultat de la pression exercée par la vapeur d'eau dans l'air ou à l'intérieur de la feuille. Elle est directement liée à la température et à l'HR. La TV augmente au fur et à mesure que la température et l'HR augmentent.

Le DS optimal se situe entre 0,5 et 1,2 kPa.

À ces valeurs de DS, les taux optimaux de transpiration et d'absorption des nutriments, associés à des sucres adéquats, donnent des plants sains, vigoureux et à haut rendement. Le DS peut être ajusté dans la serre en modifiant la température ambiante, l'HR, les taux de ventilation et le mouvement de l'air dans la serre. La modification de la quantité d'eau disponible pour la culture influence également le DS. En général, lorsque la température de l'air augmente, le point de consigne de l'HR doit également être maintenu pour maintenir le DS optimal.

Voici une méthode simple permettant de calculer le DS :

1. Déterminer la TV_{feuille}

- Mesurez la température de la feuille à l'aide d'une caméra infrarouge ou d'un autre capteur.
- Étant donné que l'intérieur d'une feuille saine est toujours humide, son HR est supposée être de 100 %.
- Déterminez la TV_{feuille} à 100 % HR à l'aide d'une calculatrice du DS en ligne.

2. Déterminer la TV_{air}

- Mesurez la température et le degré d'humidité de l'air.
- Déterminez la TV_{air} à l'aide d'une calculatrice de la TV en ligne.

3. Soustraire la TV_{air} de la TV_{feuille}

$$DS = TV_{\text{feuille}} - TV_{\text{air}}$$

Par exemple, si la température de la feuille est de 23°C, on présume toujours que l'HR de la feuille est de 100 %, alors la $TV_{\text{feuille}} = 2,81 \text{ kPa}$.

Si la température de l'air est de 20°C et l'HR de l'air est de 80 %, alors la $TV_{\text{air}} = 1,871 \text{ kPa}$ (selon une calculatrice de la TV en ligne).

$$DS = 2,81 \text{ kPa} - 1,871 \text{ kPa} = 0,939 \text{ kPa}$$

Le DS serait de 0,939 kPa. Le DS se situe alors dans la plage optimale de 0,5 à 1,2 kPa.

Au fur et à mesure que la température de l'air de la serre augmente, le point de consigne HR doit également être réglé afin de maintenir un DS optimal. Cependant, les niveaux idéaux d'HR dépendent non seulement de la température de l'air, mais aussi de la température des feuilles. À mesure que la température des feuilles augmente au-dessus de la température de l'air, l'HR requise pour maintenir un DS optimal augmente également. Par exemple, le [Tableau 5](#) montre les valeurs du DS si les températures des feuilles et de l'air sont égales. Le [Tableau 6](#) montre les valeurs de DS si la température des feuilles est de 1°C plus chaude que la température de l'air et le [Tableau 7](#) montre les valeurs de DS si la température des feuilles est de 2°C plus chaude que la température de l'air. Par exemple, lorsque la température de l'air et des feuilles est de 18°C, l'HR doit être maintenue entre 48 et 76 % afin d'obtenir un DS dans la plage optimale (0,5 à 1,2 kPa) ([Tableau 5](#)). Cependant, si la température de l'air est de 18°C mais que la température des feuilles est de 1 ou 2°C plus élevée, l'HR doit être maintenue dans une plage de 52 à 80 % ([Tableau 6](#)) ou de 56 à 88 % ([Tableau 7](#)), respectivement.

Inversement, si la température des feuilles est plus froide que la température de l'air, des niveaux d'HR inférieurs sont nécessaires pour maintenir un DS optimal. Les [Tableau 8](#) et [Tableau 9](#) indiquent les valeurs de DS si la température des feuilles est de 1 et 2°C plus froide que la température de l'air, respectivement.

Tableau 5. Valeurs du DS à différentes températures de l'air et à différents niveaux d'HR lorsque la température des feuilles est égale à la température de l'air

Légende : Les valeurs ombrées se situent dans la plage idéale de DS de 0,5 à 1,2 kPa

Temp	Humidité relative (T des feuilles = T de l'air)																									
	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64	60	56	52	48	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4	0
12	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4
13	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5
14	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6
15	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7
16	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8
17	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9
18	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1
19	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
20	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
21	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
22	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
23	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
24	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,9	3,0
25	0,0	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9	3,0	3,2
26	0,0	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,4
27	0,0	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,6
28	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	3,3	3,5	3,6	3,8
29	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	3,4	3,5	3,7	3,8	4,0
30	0,0	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,7	3,9	4,1	4,2
31	0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,1	4,3	4,5
32	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
33	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
34	0,0	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3
35	0,0	0,2	0,4	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3	4,5	4,7	4,9	5,2	5,4	5,6

Note : Temp = Température. Source : Adapté d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Tableau 6. Valeurs du DS à différentes températures de l'air et à différents niveaux d'HR lorsque la température des feuilles est 1°C supérieure à la température de l'air

Légende : Les valeurs ombrées se situent dans la plage idéale de DS de 0,5 à 1,2 kPa

Temp	Humidité relative (delta T des feuilles +1°C)																									
	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64	60	56	52	48	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4	0
12	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5
13	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6
14	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7
15	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8
16	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9
17	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1
18	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2
19	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,3
20	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
21	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
22	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
23	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3,0
24	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,2
25	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4
26	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3,0	3,2	3,3	3,4	3,6
27	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4	3,5	3,6	3,8
28	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,7	3,9	4,0
29	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	3,0	3,1	3,3	3,4	3,6	3,8	3,9	4,1	4,2
30	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1	2,3	2,5	2,6	2,8	3,0	3,1	3,3	3,5	3,6	3,8	4,0	4,2	4,3	4,5
31	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
32	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,6	4,8	5,0
33	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3
34	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6
35	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1	2,3	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5	3,7	3,9	4,1	4,4	4,6	4,8	5,0	5,3	5,5	5,7	5,9

Source : Adapté d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Tableau 7. Valeurs du DS à différentes températures de l'air et à différents niveaux d'HR lorsque la température des feuilles est 2°C supérieure à la température de l'air**Légende :** Les valeurs ombrées se situent dans la plage idéale de DS de 0,5 à 1,2 kPa

Temp	Humidité relative (delta T des feuilles +2°C)																										
	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64	60	56	52	48	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4	0	
12	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6
13	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	
14	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8	
15	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	1,9	
16	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1	
17	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0	2,1	2,2	
18	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,3	
19	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	
20	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,6	
21	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	
22	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	
23	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	
24	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	
25	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3	3,4	3,6	
26	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	3,6	3,8	
27	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,6	3,7	3,9	4,0	
28	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	3,3	3,5	3,6	3,8	3,9	4,1	4,2	
29	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6	2,7	2,9	3,1	3,2	3,4	3,5	3,7	3,9	4,0	4,2	4,3	4,5	
30	0,5	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,7	3,9	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	
31	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,0	
32	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,7	4,9	5,1	5,3	
33	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	
34	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	
35	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3	4,5	4,7	4,9	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	

Source : Adapté d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Tableau 8. Valeurs du DS à différentes températures de l'air et à différents niveaux d'HR lorsque la température des feuilles est 1°C inférieure à la température de l'air**Légende :** Les valeurs ombrées se situent dans la plage idéale de DS de 0,5 à 1,2 kPa

Temp	Humidité relative (delta T des feuilles -1°C)																									
	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64	60	56	52	48	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4	0
12	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3
13	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4
14	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	
15	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6
16	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7
17	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8
18	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9
19	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1
20	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
21	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3
22	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
23	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
24	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8
25	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,9	3,0
26	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3,0	3,2
27	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4
28	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1	2,2	2,4	2,5	2,7	2,8	3,0	3,1	3,3	3,4	3,6
29	-0,2	-0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,8	3,0	3,1	3,3	3,5	3,6	3,8
30	-0,2	-0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,1	2,3	2,5	2,6	2,8	3,0	3,2	3,3	3,5	3,7	3,8	4,0
31	-0,2	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,2
32	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5
33	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,2	4,4	4,6	4,8
34	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
35	-0,3	-0,1	0,1	0,4	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2	2,4	2,6	2,8	3,1	3,3	3,5	3,7	4,0	4,2	4,4	4,6	4,9	5,1	5,3

Source : Adapté d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Tableau 9. Valeurs du DS à différentes températures de l'air et à différents niveaux d'HR lorsque la température des feuilles est 2°C inférieure à la température de l'air

Légende : Les valeurs ombrées se situent dans la plage idéale de DS de 0,5 à 1,2 kPa

Temp	Humidité relative (delta T des feuilles -2°C)																										
	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64	60	56	52	48	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4	0	
12	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3
13	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4
14	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5
15	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6
16	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7
17	-0,2	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8
18	-0,2	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9
19	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	2,0
20	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
21	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3
22	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
23	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4	2,5	2,6
24	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
25	-0,4	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	3,0
26	-0,4	-0,2	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	3,0	3,2
27	-0,4	-0,3	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4
28	-0,4	-0,3	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6
29	-0,4	-0,3	-0,1	0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,8
30	-0,5	-0,3	-0,1	0,0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,3	2,4	2,6	2,8	2,9	3,1	3,3	3,4	3,6	3,8	4,0
31	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,6	3,8	4,0	4,2
32	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,2	4,5
33	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,8
34	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,8	5,0
35	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1	2,3	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5	3,7	3,9	4,1	4,4	4,6	4,8	5,0	5,0

Source : Adapté d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.



CHAPITRE 5

Dioxyde de carbone (CO₂)

Les plants exposés à la lumière grandissent en convertissant le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau en sucre et en oxygène. C'est ce qu'on appelle la **photosynthèse**. Environ la moitié de la quantité de CO₂ fixée par les plants pendant la photosynthèse est libérée dans l'atmosphère pendant la **respiration**. L'absorption et le rejet de CO₂ sont le fruit d'un processus qui se produit par la diffusion à travers les stomates foliaires. Les stomates ouverts faciliteront cet échange et les stomates fermés l'entraveront.

Les niveaux ambiants de CO₂ en 2023 étaient d'environ 400 parties par million (ppm). Ces niveaux fluctuent avec les saisons. Les niveaux de CO₂ augmentent avec le temps printanier plus chaud qui favorise l'activité aérobie pour décomposer les matières organiques mortes, et ils culminent au début de l'été lorsque la végétation est en pleine floraison, effectuant la photosynthèse et consommant du CO₂. La consommation de CO₂ se poursuit au fur et à mesure que la saison de croissance progresse jusqu'à ce que les niveaux atmosphériques atteignent un niveau bas à la fin de la saison.

Le cycle recommence avec la décomposition de la matière organique morte en automne et en hiver qui libère du CO₂ dans l'atmosphère.

Qu'est-ce que le CO₂?

Le CO₂ est composé d'un atome de carbone (C) et de deux atomes d'oxygène (O). C'est un gaz incolore et inodore à température ambiante, mais sous une pression plus élevée, le CO₂ est converti en liquide. Le CO₂ solide, mieux connu sous le nom de glace sèche, est produit sous haute pression et à basse température. Le CO₂ est soluble dans l'eau où il forme un acide faible connu sous le nom d'acide carbonique (H₂CO₃). Plus dense que l'air sec, il est transparent à la lumière visible. Cependant, le CO₂ absorbe et réémet le rayonnement infrarouge. Cela lui permet de piéger la chaleur et d'agir comme un gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre.

Enrichissement en CO₂ et physiologie végétale

Les cultures cultivées dans des systèmes de production d'agriculture en environnement contrôlé (AEC), tels que les serres et les fermes verticales, consomment du CO₂, car elles effectuent la photosynthèse lorsqu'elles

sont exposées à la lumière. Une culture en serre typique utilisera 4,8 à 9,6 kg/h/acre. Ce processus peut faire chuter la concentration de CO₂ des niveaux ambiants (environ 400 ppm) à 100 ppm si le site de production n'est pas ventilé. Ces faibles niveaux de CO₂ peuvent causer des problèmes phytosanitaires importants et des pertes de productivité. Il est recommandé de ventiler une serre de fruits ou de légumes à raison d'un échange d'air par heure pour reconstituer le CO₂ dans l'espace de culture.

L'enrichissement de l'air des serres en CO₂, parfois appelé fertilisation au CO₂, est également devenu une pratique courante. Cela se fait généralement en utilisant des gaz de combustion provenant de chaudières qui brûlent du gaz naturel pour générer de la chaleur et du CO₂, ou en achetant du CO₂ liquide, qui est ensuite vaporisé et pompé dans la serre (Figure 11).



Figure 11. Chaudière au gaz naturel (partie inférieure) avec épurateur de gaz de combustion (partie supérieure) pour fournir de la chaleur et du CO₂ pour la production de légumes de serre.

La qualité du CO₂ dérivé des gaz de combustion doit être surveillée pour s'assurer qu'il n'y a pas d'effets secondaires nocifs des sous-produits tels que l'éthylène (C₂H₂), l'oxyde nitrique (NO), le dioxyde d'azote (NO₂) ou le monoxyde de carbone (CO). Vous trouverez plus de renseignements sur les moyens d'enrichir les

serres en CO₂ dans la fiche d'information du ministère intitulée [Apport supplémentaire de gaz carbonique dans les serres](#), disponible sur [ontario.ca](#).

Les niveaux de CO₂ affectent la photosynthèse, la transpiration, la qualité des fruits et la tolérance au stress de la manière suivante :

1. Photosynthèse

Les plants absorbent le CO₂ par leurs stomates par diffusion. Par conséquent, plus le niveau de CO₂ à l'extérieur de la feuille est élevé, plus le niveau à l'intérieur de la feuille est élevé. Des niveaux plus élevés de CO₂ conduisent à plus de photosynthèse et sont associés à une augmentation de 15 à 30 % de la production de fruits et légumes, en moyenne. Des augmentations de production ont été observées jusqu'à 50 % dans les tomates et les poivrons et 73 % dans les concombres. Une étude a montré une augmentation de 72 % de la masse des têtes de laitue lorsque les plants étaient cultivés à moins de 1 000 ppm par rapport à 200 ppm de CO₂. Cependant, un environnement de culture avec plus de 1 200 ppm de CO₂ entraîne des taux de photosynthèse plus faibles et un rendement réduit pour les concombres de serre.

Outre le niveau de CO₂ dans l'environnement de culture, la durée de l'exposition des plants à l'enrichissement en CO₂ affecte également la photosynthèse (**dose = quantité et durée**). Si les plants sont exposés à des niveaux élevés de CO₂ pendant une période prolongée, ils subissent un processus appelé **l'acclimatation photosynthétique** où le taux de photosynthèse diminue, et les avantages des niveaux élevés de CO₂ ne sont pas aussi prononcés qu'ils l'étaient lorsque les plants y ont été exposés pour la première fois. Cette baisse de l'activité photosynthétique peut être associée à une baisse de la teneur en chlorophylle et à une accumulation d'amidon et d'autres sucres dans les feuilles qui peuvent nuire au fonctionnement des chloroplastes. Une diminution de la fonction chloroplastique peut à son tour entraîner une réduction de la photosynthèse et de la productivité des plants. À la suite d'un enrichissement prolongé en CO₂, les feuilles des plants peuvent devenir chlorotiques, déformées, roulées et friables. On pense que ces signes sont causés par un déséquilibre dans le rapport du carbone et de l'azote dans la plante. Une façon

de réduire l'acclimatation photosynthétique de la culture est de lui donner des niveaux élevés d'azote (N). Par exemple, les concombres qui ont été cultivés avec un taux élevé d'azote présentaient moins de signes d'acclimatation photosynthétique que ceux qui ont été cultivés avec des taux d'azote plus faibles.

2. Transpiration

Lorsque la concentration de CO₂ en serre est supérieure aux niveaux ambiants, elle déclenche la fermeture partielle des stomates, ce qui entraîne une diminution de la conductance stomatique (moins d'échange gazeux) et des taux de transpiration chez les plants, voire de près de 10 % de moins dans certains cas. Par conséquent, moins d'eau s'évapore des feuilles à travers les stomates et moins d'eau est absorbée par la plante. Cette réduction de la transpiration peut augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau jusqu'à 60 % dans les plants et permet aux producteurs de réduire leur facture d'eau. Cependant, des taux de transpiration plus faibles peuvent être préjudiciables aux plants par temps chaud, car la transpiration est l'un des principaux moyens par lesquels les plants se refroidissent lorsque les serres atteignent des températures élevées. La réduction de la conductance stomatique et de la transpiration par enrichissement en CO₂ est plus marquée dans des conditions nuageuses (faible luminosité) que dans des conditions ensoleillées (forte luminosité). Cet effet varie également selon les espèces végétales; il est plus prononcé chez les aubergines que chez les tomates, les concombres et les poivrons. Par conséquent, l'enrichissement en CO₂ doit être minimisé pendant les journées chaudes, en particulier les jours nuageux et dans les cultures d'aubergines, afin de permettre aux plants de maximiser leur taux de transpiration et leur capacité à se refroidir.

3. Qualité des aliments

En général, des niveaux élevés de CO₂ augmentent les niveaux de sucre et d'antioxydants et diminuent les niveaux de protéines et de minéraux dans les fruits et légumes. Cependant, il existe une variabilité entre différentes cultures et différents cultivars d'une même culture en fonction de la concentration de CO₂. Certains plants de tomates, par exemple, peuvent produire des fruits de meilleure qualité et de meilleur goût

dans des conditions de CO₂ élevé, tandis que d'autres plants de tomates peuvent avoir des niveaux réduits de lycopène - le pigment qui donne aux tomates leur couleur rouge. En outre, certains concombres cultivés sous des niveaux élevés de CO₂ ont des niveaux élevés de sucre, mais des niveaux plus faibles de fibres alimentaires. La couleur des cultures de laitue et de fraises peut changer en fonction du niveau de CO₂ dans lequel elles sont cultivées, et des niveaux plus élevés de composés sains ont été observés dans la laitue cultivée dans des conditions enrichies en CO₂. Dans l'ensemble, les plants produisent des fruits plus gros qui ont des concentrations en nutriments minéraux plus faibles lorsqu'ils sont cultivés sous des niveaux élevés de CO₂. Cela peut être attribué à un effet de dilution lorsque les plants augmentent la taille de leurs fruits, mais elles ne produisent pas plus de nutriments minéraux pour remplir les fruits plus gros.

L'effet de niveaux élevés de CO₂ sur les niveaux de sucre et de protéines dans le fruit dépend également de la disponibilité des nutriments pour la culture. Il s'agit d'un effet similaire à celui de l'azote sur l'acclimatation photosynthétique. Des études ont montré qu'aucune augmentation du rendement n'était observable lorsque les concombres étaient cultivés dans de faibles concentrations en N et en CO₂, mais que la qualité du concombre s'améliorait. En revanche, lorsque les concombres ont été cultivés sous des niveaux élevés d'azote et de CO₂, leur rendement a augmenté, mais la concentration de sucre et de fibres alimentaires dans le fruit n'a pas changé. De même, dans les tomates, l'effet de l'enrichissement en CO₂ sur les niveaux de sucres et de lycopène peut être positif ou négatif en fonction des niveaux de nutriments disponibles pour la culture.

4. Amélioration de la tolérance au stress

L'enrichissement en CO₂ améliore la capacité des plants à tolérer des stress tels que la sécheresse et la chaleur en raison de niveaux élevés de sucres solubles et d'antioxydants. Ces composés aident à protéger les cellules végétales contre les dommages dans des conditions de croissance stressantes. Dans des conditions de chaleur, cela peut être contrebalancé par la réduction associée des taux de transpiration qui peut être préjudiciable, comme mentionné ci-dessus.

Enrichissement en CO₂ et lumière et chaleur élevées

En général, l'augmentation de la photosynthèse lorsque les cultures sont cultivées sous des niveaux élevés de CO₂ est plus importante à des niveaux de lumière plus élevés qu'à des niveaux de lumière plus faibles. Cela signifie-t-il qu'augmenter les niveaux de CO₂ et de lumière est une bonne idée? Pas forcément. Par exemple, il a été démontré que l'enrichissement en CO₂ augmente les niveaux d'antioxydants dans la laitue lorsqu'elle est cultivée dans des conditions de forte luminosité et dans un rapport de lumière rouge à bleue plus élevé. Cependant, des niveaux de lumière élevés ont l'effet inverse sur les niveaux de sucre, car une lumière élevée n'augmente pas les niveaux de sucre dans les laitues, contrairement à des niveaux de lumière plus faibles dans des conditions enrichies en CO₂.

Une autre étude a montré que l'enrichissement en CO₂ réduisait le rendement en tomates commercialisables pendant les journées lumineuses et chaudes d'août dans le sud-ouest de l'Ontario. De plus, les plants de tomates cultivés dans des conditions de forte teneur en CO₂ et de forte luminosité peuvent souffrir de polyphyllie (« frenching ») où les plants développent des feuilles courtes, épaisses, bouclées et craquantes, gris-vert foncé. Il a été démontré que la polyphyllie est aggravée non seulement par une lumière élevée, mais également par des températures élevées (Figure 12). Les températures élevées, en particulier les températures nocturnes élevées, causent la polyphyllie et réduisent la production des fruits de tomate. Une polyphyllie moins sévère a été observée lorsque les plants sont cultivés à une densité végétale élevée, car cette densité peut engendrer plus d'ombre et des niveaux de lumière plus faibles dans la canopée végétale. Par conséquent, une solution pratique pour prévenir la polyphyllie consiste à utiliser une densité de tige élevée en introduisant des tiges supplémentaires au printemps.



Figure 12. Plants de tomates pendant les journées lumineuses et chaudes d'août 2005, en Ontario cultivés sous (A) les niveaux de CO₂ ambiants et (B) l'enrichissement en CO₂. Les cercles rouges indiquent un développement foliaire normal en présence du CO₂ ambiant et polyphyllie sous enrichissement en CO₂.

Source : Agriculture et Agroalimentaire Canada.

L'enrichissement en CO₂ est-il toujours une bonne idée?

Selon les données présentées dans ce chapitre, il est recommandé que les serres maintiennent des niveaux de CO₂ autour de 1 000 ppm les jours ensoleillés, de 600 à 700 ppm les jours nuageux lorsque les événements sont fermés, et de 400 ppm lorsque les événements sont ouverts à plus de 10 %. Cependant, les producteurs en serre pourraient également envisager de réduire les niveaux de CO₂ pendant les journées chaudes, en particulier les jours nuageux. Tout comme les autres paramètres de l'environnement, un contrôle approprié des niveaux de CO₂ en serre repose sur l'utilisation de capteurs qui fonctionnent correctement. Les capteurs de CO₂ doivent être étalonnés régulièrement selon les recommandations des fabricants afin d'assurer des mesures précises. À mesure que les systèmes de contrôle de l'environnement des serres deviennent plus dynamiques avec des algorithmes de prise de décision plus sophistiqués qui optimisent les points de consigne en temps réel, le contrôle du CO₂ deviendra également plus dynamique.

Références

- Aloni B. et Leah K. 2002. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 77:534.
- Becker C et Klaring H-P. 2016. *Food Chemistry*. 199:736.
- Dannehl D. et coll. 2021. *Plants*. 10:2808.
- Dong J. et coll. 2018a. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 98:4509.
- Dong J. et coll. 2018b. *Frontiers in Plant Science*. 9:924.
- Dong J. et coll. 2018 c. *Journal of Integrative Agriculture*. 17:2438.
- Dong J. et coll. 2020. *Applied Soil Ecology*. 145:103342.
- Hao X. et coll. 2006. *Canadian Journal of Plant Sciences*. 86:1395.
- Lanoue J. et coll. 2018. *PLOS ONE*. 13:1.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de l'Agroentreprise de l'Ontario. 2002. *Apport supplémentaire de gaz carbonique dans les serres*.



CHAPITRE 6

Eau

Un approvisionnement en eau suffisant et de bonne qualité est très important pour la serriculture. On doit donc choisir un site qui offre un approvisionnement abondant en eau de qualité supérieure. Le système d'irrigation doit débiter au moins 8 litres par mètre carré par jour ($L/m^2/jour$) pour combler les besoins d'une culture à pleine maturité. Certaines cultures qui atteignent leur pleine maturité en serre (p. ex., les concombres) peuvent demander jusqu'à 5 L d'eau/plant/jour durant les mois ensoleillés de l'été (Figure 13).

De nombreuses exploitations de serres dans le sud-ouest de l'Ontario utilisent l'eau des systèmes d'aqueducs municipaux. D'autres doivent se fier à l'eau d'un puits ou à l'eau de pluie accumulée dans des citernes ou des étangs (Figure 14). Dans la plupart des régions, l'eau municipale est de qualité adéquate, avec des sels solubles totaux inférieurs à 0,750 milliSiemens par centimètre (mS/cm). Il est important de tester le contenu microbien, chimique et minéral de l'eau de puits brute, qui peut être de mauvaise qualité, avant de l'utiliser pour l'irrigation de routine. Les eaux de rivière ou de ruisseau non traitées ne sont pas recommandées en raison du risque élevé de contamination persistante ou transitoire en

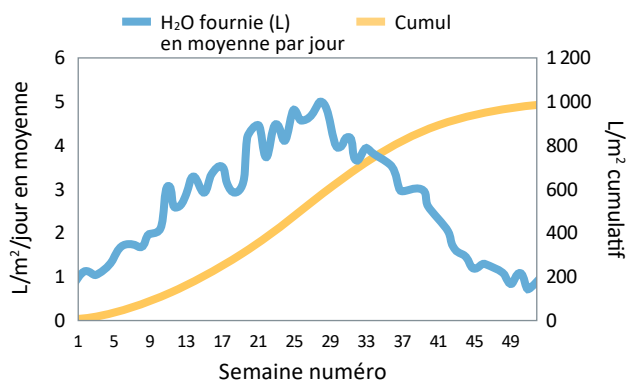


Figure 13. Application d'eau dans les légumes de serre.

Source : Agriculture et Agroalimentaire Canada — Centre de recherche et de développement de Harrow.



Figure 14. Étang d'irrigation de serre.

amont qui pourrait affecter négativement les cultures. En règle générale, la qualité de l'eau destinée à être utilisée en serre peut être divisée en trois classes (Tableau 10).

Classe 1 — l'eau est bonne pour toutes les applications d'irrigation. L'eau puisée dans les lacs Érié et Ontario entre le plus souvent dans cette classe.

Classe 2 — l'eau ne doit être utilisée dans les cultures sur substrat et sur sol que si un lessivage adéquat est possible. Cette eau ne convient toutefois pas à la culture sur film nutritif ni aux cultures sensibles au sel soumises à des systèmes d'irrigation souterraine.

Classe 3 — l'eau n'est pas recommandée sur des cultures sensibles au sel (comme le concombre) ni sur les cultures produites avec un volume restreint de racines ou dans des systèmes de recirculation des solutions nutritives. Une teneur en sel mesurée par conductivité électrique (CE) supérieure à 1,5 mS/cm est considérée comme limite pour l'irrigation des cultures de serre. Il est parfois possible d'utiliser une telle eau, mais il arrive que les rendements en souffrent. La concentration toxique de sodium (Na) est inférieure à celle des chlorures (Cl). Elle peut nuire à l'absorption du potassium, du calcium et du magnésium. Certaines cultures (dont le concombre) sont sensibles aux chlorures. Notez que pour la plupart des régions de l'Ontario, les niveaux de Na sont faibles dans l'eau de puits, tandis que les sulfates peuvent être relativement élevés dans les nappes aquifères. La plupart des cultures ont besoin tout au plus de 100 ppm de sulfates (33 ppm de soufre élémentaire) pour répondre à leurs besoins en soufre.

La qualité de l'eau d'irrigation est plus importante dans les cultures hydroponiques ou sans sol que dans les cultures sur sol (Tableau 11). Il faut en tenir compte dans l'établissement d'un programme de fertilisation. Par exemple, si l'eau contient une grande quantité de calcium ou de magnésium (p. ex. dans l'eau de puits de nappes aquifères en calcaire ou en dolomie), réduire proportionnellement les taux de nitrate de calcium et de sulfate de magnésium. Compenser la perte d'azote due à ces ajustements par une augmentation de la quantité des autres sources

d'engrais azoté (p. ex. nitrate d'ammonium). Certaines réserves d'eau peuvent renfermer des concentrations élevées d'éléments comme le fer, le zinc et le manganèse, particulièrement l'eau non traitée de puits artésiens.

Les opérations d'irrigation fertilisante des légumes de serre doivent se faire avec une eau renfermant moins que 50 ppm de Na et moins que 70 ppm de Cl. Si l'eau contient plus de 100 ppm de Na ou 140 ppm de Cl, trouvez des sources d'eau de remplacement ou utilisez un système de purification d'eau, notamment l'osmose inverse (OI) pour diluer ou éliminer ces ions. Les tomates peuvent être cultivées sans trop de difficulté dans une solution nutritive contenant 100 ppm de chlorures. Cependant, il est préférable de choisir une source d'approvisionnement en eau ayant une faible teneur en sodium et en chlorures. L'eau de pluie est faible en Na et en Cl; cependant, si elle est utilisée, assurez-vous d'ajuster le niveau de bicarbonate, car il sera trop faible pour une bonne gestion de la solution. Ajoutez du bicarbonate de potassium à l'eau (pas aux solutions mères) pour relever son niveau. Lorsque la concentration de bicarbonate dans l'eau est supérieure à 60 ppm, ajouter des acides nitrique ou phosphorique afin d'obtenir le pH voulu (5,5-5,8).

La fréquence et la quantité de l'**irrigation fertilisante** peuvent être programmées de sorte que l'arrosage soit activé par des variables telles que la lumière, la teneur en eau du milieu de culture ou le poids ou une combinaison de ces facteurs. Les capteurs de lumière permettent de calculer la quantité de lumière qui se trouve dans la serre et de déclencher l'irrigation en fonction de la quantité totale de lumière reçue depuis le dernier événement d'irrigation. Les capteurs de teneur en eau peuvent déclencher un arrosage lorsque la zone racinaire devient trop sèche. Il a été démontré que ces types de techniques agricoles de précision réduisent considérablement la consommation d'eau par rapport à l'arrosage qui est fondé sur des intervalles de temps prédéfinis, car ils permettent une flexibilité pendant les jours nuageux où moins d'arrosage est nécessaire par rapport aux jours ensoleillés où plus d'eau est nécessaire.

Tableau 10. Classes de qualité de l'eau en fonction de la teneur en sel

Classe	Conductivité électrique (mS/cm) ¹	Sodium (ppm)	Chlorures (ppm)	Sulfates (ppm)
1	0,5	<30	<50	<100
2	0,5–1	30–60	50–100	100–200
3	1,0–1,5	60–90	100–150	200–300

¹ 1 mS/cm = 1 mmhos/cm ou 1 000 µS/cm = 1 000 µmhos/cm

Remarques : Utiliser ce tableau comme guide pour évaluer la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation des cultures légumières de serre.

N'utiliser que de l'eau de classe 1 pour les cultures sensibles au chlore (p. ex., les concombres).

Les teneurs en sodium et en chlorures correspondent normalement à celles qui sont indiquées dans ce tableau. Si les concentrations de sodium se situent dans la fourchette de 3060 ppm, par exemple, il est probable que les concentrations de chlorures se situeront dans la fourchette de 50-100 ppm. Si tel n'est pas le cas, la classe de l'eau repose sur la concentration de l'ion le plus concentré.

Tableau 11. Caractéristiques recommandées pour l'eau de source

Caractéristique	Niveau	Caractéristique	Niveau (ppm)	Caractéristique	Niveau (ppm)
Conductivité électrique (CÉ) (mS/cm)	0–0,5	Azote (N), nitrate (NO ₃), ion ammonium (NH ₄)	<5	Fer (Fe)	<1
pH	5,4–6,8	Phosphore (P)	<1	Bore (B)	<0,3
Alcalinité, carbonate (CaCO ₃), bicarbonate (HCO ₃) (ppm)	40–65	Potassium (K)	<10	Cuivre (Cu)	<0,1
Dureté (CaCO ₃) (ppm)	<100	Calcium (Ca)	<60	Zinc (Zn)	<0,2
Sodium (Na) (ppm)	<50	Sulfates (SO ₄)	<30	Aluminium (Al)	<2
Chlorure (Cl) (ppm)	<71	Magnésium (Mg)	<5	Chlorure (Cl)	<2
Rapport d'adsorption du sodium	<4	Manganèse (Mn)	<1	Fluorure (F)	<1



CHAPITRE 7

Recyclage et désinfection de la solution nutritive

Le rejet de la solution nutritive de l'exploitation en serre dans les masses d'eau de surface et souterraines environnantes a des répercussions environnementales négatives (p. ex., eutrophisation, températures élevées, contaminants chimiques, etc.). Le recyclage de la solution nutritive permet non seulement de réduire le déversement d'eau, mais permet également au serriculteur d'utiliser de 25 à 30 % moins d'eau et de 30 à 40 % moins d'engrais pour son exploitation. Les producteurs en serre visent généralement à ce qu'environ 25 % de la solution d'irrigation fertilisante appliquée s'échappe de la zone racinaire. Cela garantit un arrosage adéquat tout en évitant l'accumulation de sels d'engrais dans le substrat en croissance.

Bien que le recyclage des solutions nutritives soit une utilisation efficace des ressources, certains éléments préoccupants doivent être pris en compte lors de la capture et de la réutilisation des eaux de ruissellement fertilisantes (eaux de percolation). Lorsque la solution nutritive traverse la zone racinaire, les plants absorbent les

nutriments et excrètent des produits chimiques qui modifient la composition globale de la solution nutritive. Les niveaux de nutriments, la conductivité électrique (CE) et le pH du lixiviat doivent être réajustés avant que celui-ci ne soit recirculé à la culture (Figure 15).

Le potentiel de prolifération des agents pathogènes par l'intermédiaire du système d'arrosage est une autre préoccupation liée à la recirculation de la solution nutritive. Au fil du temps, les microbes s'accumulent dans l'eau recirculée, y compris les champignons, les oomycètes, les bactéries et les virus. Cela peut conduire au développement de maladies des racines causées par, mais sans s'y limiter, les espèces *Phytophthora* et *Pythium*. Toutefois, tous les microbes qui vivent dans les systèmes d'eau recirculée ne sont pas mauvais. Beaucoup ne sont pas pathogènes pour la culture et peuvent, en fait, être bénéfiques en rivalisant avec les agents pathogènes (microbes qui causent des maladies) pour les nutriments et l'espace de vie. De plus, des recherches émergentes suggèrent que certains micro-organismes bénéfiques peuvent également améliorer directement la santé et la productivité des plants (p. ex., les rhizobactéries). Pour en savoir davantage, consulter la publication 836A : *Lutte intégrée contre les ennemis des cultures de fruits et de légumes en serre*.

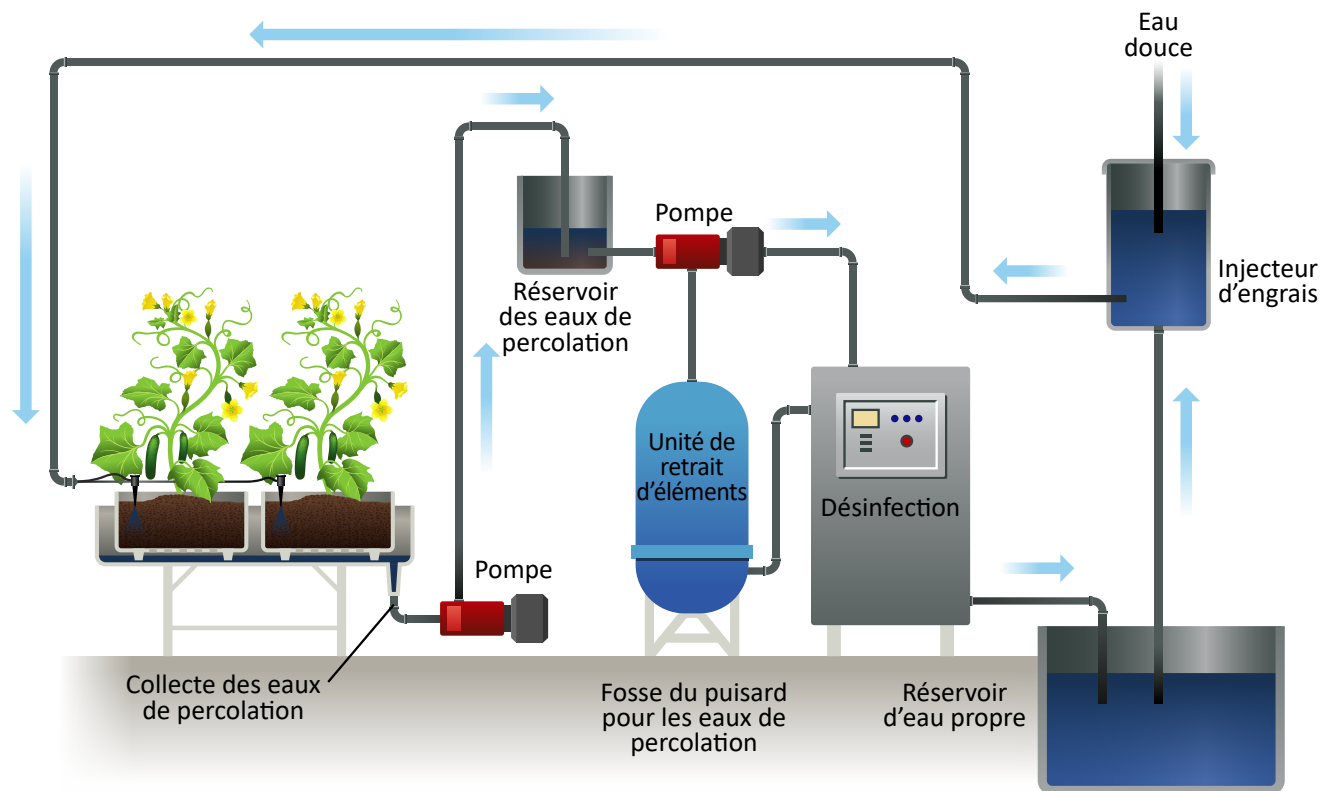


Figure 15. Schéma du système de recyclage de la solution nutritive.

Pour éviter le développement de maladies, il est recommandé que les serres installent un équipement de filtration et de désinfection spécifique au site afin de réduire la charge pathogène de l'eau recyclée. Cette section donne un aperçu des technologies de filtration et de désinfection de l'eau utilisées dans les serres. Elle décrit les avantages et les inconvénients des systèmes les plus populaires actuellement utilisés dans les serres, notamment la filtration physique (filtres à membrane), la biofiltration, le traitement thermique (pasteurisation), la lumière ultraviolette (UV) et le traitement à l'ozone. Une attention particulière est accordée à la question de savoir si un système encourage la croissance microbienne bénéfique tout en réduisant les niveaux d'agents pathogènes. Une approche systémique doit être envisagée lors de la conception des systèmes de traitement de l'eau recirculée en serre. Pour plus d'informations sur les options de gestion des produits chimiques et du biocontrôle, voir la publication 836A : *Lutte intégrée contre les ennemis des cultures de fruits et de légumes en serre*.

Filtres membrane

La capacité des filtres membrane à éliminer les agents pathogènes de l'eau recirculée dépend

de la taille de leurs pores. À mesure que la taille des pores diminue, la taille des microbes qui peuvent passer à travers le filtre diminue également (Tableau 12).

La gamme de taille de la plupart des champignons est de 3 à 50 micromètres (μm), les bactéries se situent entre 0,6 et 3,5 μm et les virus sont les plus petits à environ 0,03 à 0,3 μm . Les filtres adaptés à l'élimination des microbes ont une taille de pores $< 10 \mu\text{m}$. Les **microfiltres** éliminent les particules $\geq 50 \mu\text{m}$, les **ultrafiltres** éliminent les particules $\geq 0,02 \mu\text{m}$ (20 nanomètres [nm]), les **nanofiltres** éliminent les particules $> 0,01 \mu\text{m}$ (10 nm) et les **hyperfiltres** (ceux utilisés en osmose inverse [OI]) éliminent les particules $\geq 0,0001 \mu\text{m}$ (0,1 nm) (Figure 16). Les filtres avec des pores plus grands (5-7 μm) sont efficaces pour éliminer les oomycètes de *Phytophthora* et de *Pythium*.

La filtration à l'aide d'une membrane est plus efficace pour contrôler les agents pathogènes lorsqu'elle est mise en place dans une série de filtres à plusieurs niveaux (des filtres à grands pores aux filtres à plus petits pores) pour éviter le colmatage rapide des filtres plus fins. Les producteurs doivent commencer par un

Tableau 12. Gamme de taille des micro-organismes et des pores des filtres membrane

Microorganisme	Gamme de taille (micromètres [µm])
Champignons	3–50
Bactéries	0,6–3,5
Virus	0,03–0,3
Type de filtre	Plage de taille des pores (micromètres [µm])
Microfiltres	50
Ultrafiltres	0,02
Nanofiltres	0,01
Hyperfiltres	0,0001

**Figure 16.** Système de filtration par osmose inverse.

filtre à tamis grossier pour éliminer les débris, suivi d'une série de filtres à pores de taille décroissante. Une chose à garder à l'esprit est que la taille des pores du filtre limite non seulement le passage des microbes, mais également le passage de l'eau, ce qui entraîne une contre-pression sur le système. À mesure que la taille des pores du filtre diminue, le débit d'eau diminue et une pression plus élevée est

nécessaire pour maintenir le débit. Le débit peut varier entre 20 et 60 L/min en fonction de la taille des pores du filtre. Par conséquent, les filtres avec de petits pores qui réduisent le débit peuvent ne pas être idéaux pour les exploitations qui nécessitent de grands volumes d'eau. Autrement, la configuration des filtres peut être modifiée (p. ex. plusieurs filtres polisseurs sur des lignes de distribution ou un groupe de filtres fonctionnant en parallèle), mais les coûts d'installation et d'entretien doivent être pris en compte dans cette complexité supplémentaire.

Avantages des filtres membrane

- Les filtres membrane sont recommandés comme première étape de base dans un système de traitement de l'eau pour réduire la quantité de débris et de matière organique dans l'eau tels que le sol, les tissus végétaux et les nutriments précipités. Les débris et la matière organique peuvent réduire l'efficacité d'autres traitements tels que la chaleur (pasteurisation), la lumière UV et l'ozone, comme indiqué ci-dessous.
- L'utilisation de filtres en plusieurs étapes de sorte que les filtres avec de grandes tailles de pores soient suivis de filtres des pores plus petits réduit le risque de blocage.
- Les filtres ne nécessitent pas de produits chimiques, il n'y a donc pas de problème de phytotoxicité (dommages aux cultures attribuables aux produits chimiques).
- Les hyperfiltres utilisés dans l'OI peuvent être utilisés non seulement pour éliminer les agents pathogènes, mais également pour éliminer les sels en excès tels que le sodium et le chlorure. Ils peuvent être utilisés pour améliorer la qualité de certaines sources d'eau. Par exemple, les puits peuvent avoir des niveaux élevés de sel.

Inconvénients des filtres membrane

- Les filtres ne font pas de distinction entre les microbes bénéfiques et les microbes pathogènes. Tous les microbes sont filtrés en fonction de leur taille.
- Les filtres ont des coûts d'installation plus élevés que certains autres systèmes de désinfection.

- Plus la taille des pores est petite, plus le débit d'eau est faible. Si l'exploitation a des besoins élevés en eau, il peut être nécessaire d'assurer un débit d'eau élevé offert par des filtres avec des pores de plus grande taille ou plusieurs filtres distribués de plus petite taille. Si des filtres à pores de plus grande taille sont utilisés, les microbes ont plus de chances de traverser le système de filtration et de retourner à la culture. Autrement, une approche d'irrigation par voie secondaire ou de dérivation peut être utilisée dans certaines circonstances.
- Les filtres peuvent être obstrués par des solides en suspension (sable, limon, matière organique), des précipités chimiques (fer [Fe], manganèse [Mn], carbonates, pesticides), des biofilms et des algues. Cela peut nécessiter une étape de lavage à contre-courant qui, bien qu'efficace, ajoute à la complexité du système et à l'utilisation globale de l'eau.
- Les filtres ne fonctionneront pas correctement s'ils sont endommagés. Ils doivent être remplacés ou entretenus régulièrement pour réduire le risque de fuite ou de percée. Les fuites à petite échelle ne sont pas facilement détectées et il n'y a pas de système d'avertissement pour informer les producteurs qu'un filtre est endommagé ou percé.
- L'OI élimine les nutriments de sorte qu'elle ne doit être utilisée que pour la filtration des sources d'eau externes telles que les puits et les aqueducs municipaux.

Filtration lente sur sable et biofiltration

Les filtres à sable et les biofiltres lents se composent d'un lit filtrant à base de sable (ou d'un composé similaire) qui permet le passage lent de l'eau à travers le milieu, ce qui soutient une communauté de microbes bénéfiques qui consomment la matière organique entrant dans le filtre (Figure 17). Le matériau filtrant est généralement du sable, mais il peut également s'agir de laine de roche granulée, de grain de roche volcanique, de pierre ponce ou d'antracite. Il est recommandé d'avoir une épaisseur minimale de lit filtrant de 50 à 80 cm et une taille de grain de sable inférieure à 2 mm. Le filtre est généralement soutenu par des couches de gravier en dessous. L'eau passe généralement très lentement à travers le matériau filtrant à une vitesse de 100 à 300 L/m²/h. La force de gravité est utilisée pour pousser ou aspirer l'eau à travers le système. Une couche d'eau au-dessus du filtre d'environ 80 à 150 cm est nécessaire pour générer suffisamment de pression hydrostatique sur la colonne pour faciliter un débit adéquat. Après un certain temps, une couche biologiquement active se forme sur le dessus du filtre avec une population d'algues, de bactéries, de champignons et d'autres microbes qui forment des biofilms. Cette couche, qu'on appelle un film biologique (« schmutzdecke »), est essentielle pour réduire les agents pathogènes. Le matériau filtrant piège physiquement les particules

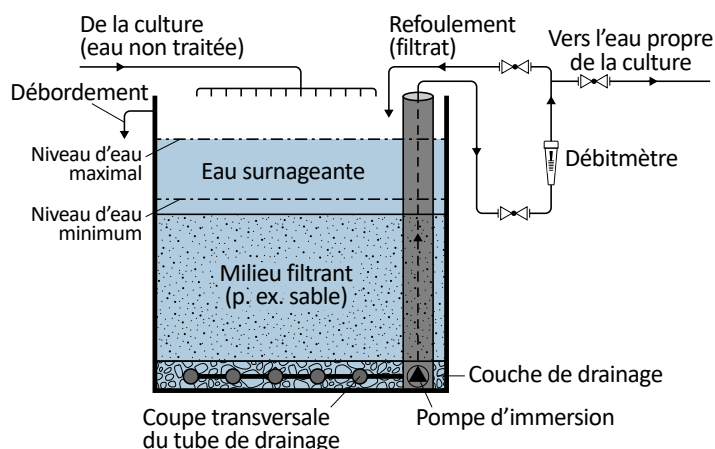


Figure 17A

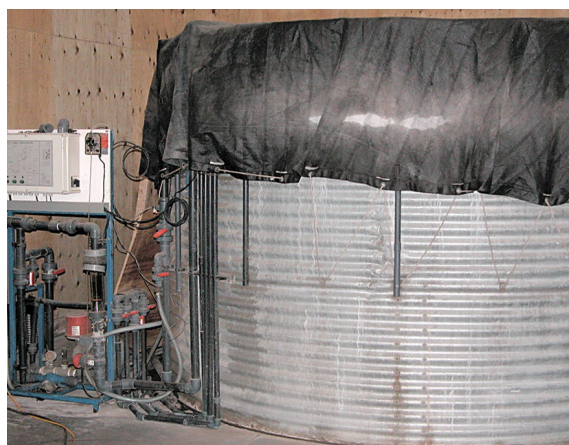


Figure 17B

Figure 17. (A) Schéma du système de filtration lente sur sable. (B) Système de filtration lente sur substrat de roches volcaniques.

Source : (A) Ehret et coll. 2001

inorganiques et organiques, y compris les agents pathogènes. L'activité biologique et chimique du film biologique décompose les particules piégées et tue les agents pathogènes.

Le maintien de l'activité du film biologique est très important pour le succès des filtres à sable lents. Il est recommandé que l'eau s'écoule doucement sur le filtre afin de ne pas endommager le film biologique des couches supérieures. Un débit de 10 à 30 cm par heure permettrait une capacité de filtration de 100 à 300 L/m²/h. Ces systèmes sont considérés comme des écosystèmes qui ont besoin de nutriments et d'un environnement approprié pour survivre et prospérer. Le faible débit de ces systèmes est intentionnel pour donner suffisamment de temps pour que les processus biologiques et chimiques se produisent. Ces réactions nécessitent également des niveaux d'oxygène adéquats (>3 mg/L) et une température optimale (10-20°C).

Tout en réduisant les agents pathogènes, ces systèmes favorisent la croissance de microbes bénéfiques dans l'eau recyclée. Les systèmes de recirculation d'irrigation qui utilisent une filtration lente sur sable sont généralement riches en bactéries (10³-10⁴ unités formant des colonies par millilitre). Cette population de bactéries est considérée comme bénéfique pour les plants et réduit la capacité des agents pathogènes à coloniser les racines. Cependant, il manque une compréhension complète du fonctionnement de ces filtres.

Un autre élément important des filtres à sable lents est la taille des grains de sable. La filtration est améliorée en utilisant des grains plus petits, similaires à la taille des pores du filtre mentionnée dans la section précédente. Les petits grains ont plus de surface par unité de volume du lit filtrant, ce qui leur permet de filtrer plus d'eau. Plus la taille des grains est petite, meilleure est leur capacité à piéger les matières organiques et inorganiques. Une efficacité de filtration élevée se produit lors de l'utilisation de sable d'une granulométrie fine et moyenne comprise entre 0,15 et 0,8 mm. Cependant, plus la taille des grains est petite, plus le débit d'eau est faible (encore une fois, similaire à la taille des pores du filtre mentionnée dans la section précédente).

L'activité biologique et chimique du film biologique, en combinaison avec la filtration physique des grains, s'est avérée très efficace pour réduire les charges d'agents pathogènes dans les solutions d'irrigation recyclées. Des études ont montré une réduction de Phytophthora, de Pythium et des virus de 95 à 100 % en utilisant ce système. Les systèmes modernes qui fonctionnent sur un concept similaire aux filtres à sable lents sont connus sous le nom de biofiltres ou de bioréacteurs (Figure 18).



Figure 18. Bioréacteur moderne.

Avantages de la filtration lente sur sable

- Maintient les microbes bénéfiques naturels dans l'eau recirculée.
- Un système de filtration et de désinfection relativement simple, peu technologique et peu coûteux, nécessitant un minimum d'énergie et une formation spécialisée pour son entretien.
- Aucun effet secondaire phytotoxique n'a été observé lors de l'utilisation de filtres à sable lents.

Inconvénients de la filtration lente sur sable

- Les débits lents ne permettent pas d'utiliser des filtres à sable lents dans les exploitations qui nécessitent de grands volumes d'eau.
- Les filtres à sable lents nécessitent beaucoup d'espace pour être installés, ce qui s'accompagne d'un coût d'installation élevé.
- Le film biologique doit être partiellement retiré toutes les quelques semaines en grattant les couches supérieures pour éviter les blocages.
- L'oxygène peut être réduit dans la solution en raison de la consommation dans le film biologique. L'oxygène doit être complété par une aération ou une supplémentation en gaz actif dans la solution nutritive.
- La fluctuation des températures peut affecter l'efficacité, car l'activité métabolique est liée à la température.

Chaleur (pasteurisation)

Les températures élevées perturbent l'intégrité cellulaire et interrompent les processus métaboliques chez les micro-organismes (Figure 19). Si vous appliquez suffisamment de chaleur pendant une longue période, tous les micro-organismes seront détruits. La température et le temps de contact sont tous deux importants pour ce processus (dose = quantité et durée). Plus vous appliquez de chaleur pendant une période donnée, moins vous avez besoin de temps de contact pour tuer les agents pathogènes. Inversement, si vous réduisez la chaleur appliquée pendant une période donnée, il faudra généralement plus de temps pour tuer les agents pathogènes. C'est la prémisse derrière l'utilisation de la chaleur pour désinfecter la solution nutritive recyclée. Ces types de systèmes font passer l'eau à travers une série d'échangeurs de chaleur jusqu'à ce que la température cible et le temps de contact souhaité soient atteints. La chaleur est ensuite récupérée pour refroidir l'eau avant d'être réappliquée à la culture.

Le moyen le plus rapide de tuer la plupart des microbes est de chauffer l'eau à 95°C pendant 30 secondes. Ce processus est efficace pour contrôler *Pythium* et *Phytophthora*, ainsi que certains virus. La température peut être diminuée

à 60°C pour réduire la facture énergétique, mais le temps d'exposition doit être augmenté à 2 minutes pour éliminer les champignons, les bactéries et les nématodes. L'eau doit être chauffée à au moins 85°C pendant 3 minutes pour tuer les virus. Il est recommandé de réduire le pH de l'eau à 4,5 avant de chauffer pour réduire la précipitation de calcium sur les plaques d'échange de chaleur métalliques. L'utilisation de matériaux sans corrosion (tels que l'acier inoxydable) est également recommandée.



Figure 19. Système de désinfection thermique (pasteurisation) (à gauche) et réservoirs d'eau propre et sale (à droite).

Avantages des pasteurisateurs

- Les températures élevées sont efficaces pour contrôler de nombreux agents pathogènes.

Inconvénients des pasteurisateurs

- La chaleur, comme la plupart des techniques de désinfection, ne fait pas de distinction entre les microbes bénéfiques et les microbes pathogènes.
- Les températures élevées ont des effets indésirables tels que la précipitation de certains sels. Ces précipités peuvent bloquer le système d'irrigation et réduire la disponibilité de ces minéraux pour la culture.
- La chaleur réduit la quantité d'oxygène dissous dans l'eau, de sorte qu'une supplémentation en oxygène par aération ou injection active peut être nécessaire après le traitement thermique.

Lumière ultraviolette (UV)

La lumière UV est un rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde comprise entre 100 et 400 nm. Les lampes UV germicides émettent un rayonnement qui provoque une réaction photochimique qui endommage le matériel génétique des micro-organismes (ADN et ARN), réduisant ainsi leur capacité de reproduction et de croissance. La longueur d'onde UV optimale pour tuer les microbes est d'environ 254 nm. Les lampes à mercure à haute pression émettent un rayonnement UV-C d'une longueur d'onde comprise entre 200 et 280 nm, tandis que les lampes à basse pression émettent environ 254 nm. Les lampes à haute pression sont moins économes en énergie que les lampes à basse pression, mais les deux sont efficaces pour contrôler les agents pathogènes dans la solution nutritive recirculée, si la dose appropriée est atteinte (Figure 20).



Figure 20. Système de désinfection à rayons UV.

À l'instar du traitement thermique, l'efficacité de la désinfection UV dépend de la **dose** (quantité et durée) du traitement UV. La dose est mesurée en millijoules par centimètre carré (mJ/cm^2). La dose efficace d'un traitement UV peut varier de 28-850 mJ/cm^2 . Une dose de rayonnement UV de 100 mJ/cm^2 est suffisante pour éliminer les champignons pathogènes, tandis qu'une dose plus élevée de 250 mJ/cm^2 est recommandée pour éliminer tous les organismes, y compris les virus. Une dose encore plus élevée de 500 mJ/cm^2 est nécessaire pour atteindre 96 % de mortalité de

certains nématodes, tandis qu'une dose de 100 mJ/cm^2 empêche la reproduction d'autres nématodes et réduit l'infection des racines des plants. Certaines espèces de *Phytophthora* et de *Pythium* peuvent être contrôlées avec des doses de rayonnement UV aussi faibles que 17-88 mJ/cm^2 . En plus de la dose, l'efficacité de la désinfection dépend également du débit d'eau exposé à la source de rayonnement UV. Plus le débit d'eau est lent, plus les microbes sont exposés à la lumière UV, ce qui augmente la mortalité. La clarté de l'eau est le facteur le plus important affectant l'efficacité du traitement. La lumière UV est réfléchiée ou absorbée par de nombreux matériaux dans l'eau tels que les solides en suspension ou les débris végétaux. Ces particules peuvent protéger les microbes de la lumière UV et réduire la mortalité. L'eau recyclée doit être filtrée avant le traitement aux rayons UV pour éliminer les particules en suspension de l'eau. Cela augmente la pénétration et la transmission de la lumière UV. Un taux de transmission UV minimum de 60 % est essentiel pour que la lumière UV désinfecte efficacement l'eau d'irrigation recyclée : c'est-à-dire que l'eau doit être suffisamment claire pour qu'au moins 60 % de la lumière UV émise par la lampe passe à travers l'eau et ne soit pas absorbée ou réfléchiée par les particules. Le fer (Fe) absorbe également une partie de la bande d'ondes UV. Compte tenu de la nécessité du fer en tant que micronutriment, il est souvent présent ou ajouté à des solutions de fertilisation et aura une incidence sur l'efficacité des traitements UV.

Avantages des rayons UV

- La lumière UV n'est pas corrosive, ne dépend pas du pH de la solution et ne nécessite pas de produits chimiques supplémentaires.
- Les rayons UV peuvent être combinés à d'autres systèmes (p. ex. l'ozone) dans le cadre d'un processus d'oxydation avancé.

Inconvénients des rayons UV

- La lumière UV, comme le traitement thermique, ne fait pas de distinction entre les microbes bénéfiques et les agents pathogènes.
- Il a été démontré que le traitement de solutions nutritives recyclées avec des rayons UV de haute

intensité inhibe la croissance des plants de laitue en aval du traitement, potentiellement en raison de la génération d'ozone ou de radicaux libres pouvant nuire aux plants.

- La lumière UV peut détruire certains chélates de fer (Fe), ce qui peut faire précipiter Fe hors de la solution et recouvrir la lampe UV, ce qui réduira le rayonnement réel de la lampe. En outre, le Fe lui-même absorbe la lumière UV, réduisant ainsi le nombre de photons disponibles pour inactiver les agents pathogènes. Or, le manque de Fe en solution peut entraîner une chlorose du Fe si les niveaux ne sont pas modifiés après le traitement. Cependant, certains chélates fonctionnent mieux sous traitement UV, empêchant les effets négatifs de la carence en Fe induite par les rayons UV.
- Le traitement à la lumière UV peut être coûteux, nécessitant un entretien fréquent pour nettoyer ou remplacer les lampes. Les lampes UV se dégradent relativement rapidement avec le temps, ce qui entraîne une réduction de la dose (jusqu'à 10 % de perte après 1 000 heures de fonctionnement et 35 % de perte après un fonctionnement continu pendant un an). Les lampes UV doivent être surveillées et changées au besoin.

Ozone (O₃)

L'ozone est un oxydant très puissant. Les agents oxydants peuvent endommager les lipides, les protéines et l'ADN. L'ozone est plus de 1,5 fois plus fort que le chlore. Il agit par oxydation directe ou par la production de radicaux libres hydroxyles et d'ions superoxydes de courte durée de vie (soit de mauvais éléments qui peuvent blesser les êtres vivants). L'ozone est généré en combinant un atome d'oxygène (O-) avec une molécule d'oxygène (O₂), soit deux atomes d'oxygène liés ensemble, pour former de l'ozone (O₃) (Figure 21). Comme indiqué dans la section précédente, la lumière UV peut être utilisée pour générer de l'ozone, mais des concentrations beaucoup plus élevées sont produites si l'électricité est utilisée comme source d'énergie pour cette réaction. Par exemple, les générateurs d'ozone à décharge coronaire utilisent l'électricité pour produire de l'ozone à partir de l'air, tandis que les générateurs d'ozone électrolytiques utilisent l'électricité pour produire de l'ozone directement dans l'eau.



Figure 21. Système de désinfection à l'ozone.

Une fois que l'ozone est généré, il est relativement instable et se décompose en oxygène (O₂), ou réagit avec d'autres matériaux, dans un court laps de temps. L'ozone a une demi-vie inférieure à 20 minutes lorsqu'il est dissous dans de l'eau propre. Cette instabilité peut être une bonne et une mauvaise chose. Du côté positif, une fois que l'ozone est produit dans l'eau recyclée, il tue les microbes et se décompose rapidement. Il est recommandé de traiter les solutions jusqu'à ce qu'une concentration résiduelle minimale d'ozone d'environ 0,5 mg par L soit atteinte et maintenue pendant environ 5 minutes. Ce résidu se dégrade automatiquement ou peut être facilement éliminé avec un filtre de destruction de l'ozone avant la distribution à la culture. Cela dit, il existe des preuves qui suggèrent qu'un petit résidu pourrait être maintenu pendant la distribution pour aider à garder les tuyaux et les émetteurs propres sans endommager les cultures. En outre, parce que l'ozone se décompose en oxygène, il a le potentiel d'augmenter considérablement les niveaux d'oxygène dissous. Toutefois, l'un des inconvénients de la courte demi-vie de l'ozone signifie qu'il doit être produit au point d'utilisation et immédiatement dissous dans la solution.

Semblable au traitement par la chaleur et la lumière UV, l'efficacité de l'ozone dépend du microbe cible que vous essayez de tuer et de la **dose** (quantité et durée) d'ozone. La plupart des micro-organismes préoccupants pour les producteurs sont contrôlés si l'ozone est appliqué jusqu'à ce qu'un résidu d'environ 0,5 mg/L puisse être maintenu pendant 5 minutes dans la solution en vrac (c.-à-d. dans le réservoir), mais cela peut augmenter à 100 mg/L pendant 30 minutes pour certains virus. L'obtention de ce résidu nécessitera des quantités d'ozone considérablement différentes en fonction du niveau de contamination initial de l'eau.

Les chélates de manganèse (Mn), de fer (Fe) et de micronutriments peuvent être oxydés par l'ozone et donc concurrencer d'autres contaminants ou agents pathogènes pour l'ozone appliqué. Cette concurrence augmente la demande en ozone dans la solution, ce qui entraîne des délais de traitement plus longs.

La taille des bulles utilisées par le système pour infuser le gaz ozone dans l'eau est un autre élément important des systèmes de désinfection à l'ozone. En général, les petites bulles sont plus efficaces pour tuer les microbes que les grosses bulles. En effet, les petites bulles sortent de la solution plus lentement et génèrent plus de radicaux hydroxyles lorsqu'elles éclatent ou cavitent que les grosses bulles. Par exemple, il a été démontré que les microbulles (diamètre < 50 µm) tuent les microbes plus rapidement que les millibulles (diamètre en mm-cm). Maintenant, il existe des systèmes qui peuvent produire des nanobulles (diamètre en nm).

Avantages de l'ozone

- En plus d'éliminer les agents pathogènes et les micro-organismes, l'ozone dégrade les pesticides et autres contaminants dans la solution.
- L'ozone présente un faible danger pour l'environnement en raison de sa très courte demi-vie dans l'eau.
- L'ozone peut augmenter les niveaux globaux d'oxygène dissous lorsqu'il réagit ou redevient de l'oxygène.

Inconvénients de l'ozone

- Ne fait pas de distinction entre les microbes bénéfiques et les agents pathogènes.
- Les systèmes de traitement de l'ozone ont un coût élevé d'installation et d'entretien.
- Des niveaux élevés d'ozone peuvent être phytotoxiques si l'ozone ne se décompose pas assez rapidement avant que la solution recyclée ne soit réappliquée à la culture.
- La demande en ozone peut être très élevée dans l'eau ayant un pH élevé, des concentrations élevées de matière organique, de nitrite, de manganèse, de fer ou de bicarbonate.
- L'ozone gazeux est dangereux et des mesures appropriées de formation du personnel, de manipulation et de sécurité doivent être en place.
- L'ozone est un oxydant agressif et, en tant que tels, les composants du système doivent être compatibles (p. ex. les raccords en caoutchouc se désintègreront rapidement).

Filtration et désinfection en plusieurs étapes

Il n'existe pas de solution unique pour le traitement de l'eau; il convient plutôt d'adopter une approche systémique qui déploie les technologies de traitement de l'eau appropriées aux besoins spécifiques de l'exploitation en matière de qualité de l'eau. De nombreux producteurs en serre installent plusieurs systèmes de filtration et de désinfection qui fonctionnent en série. Cela garantit la redondance de leurs opérations et leur donne la tranquillité d'esprit que leur eau recyclée ne contient pas de niveaux élevés d'agents pathogènes pouvant causer des maladies (Figure 22).

Il est recommandé que les producteurs vérifient régulièrement le niveau d'agents pathogènes dans leur eau de source et leur eau recyclée; et avant et après la filtration et la désinfection pour s'assurer que leurs systèmes de filtration et de désinfection fonctionnent comme ils le devraient. Les échantillons d'eau peuvent être envoyés à plusieurs laboratoires accrédités et certifiés en Ontario qui offrent des services d'identification et de quantification. Ces

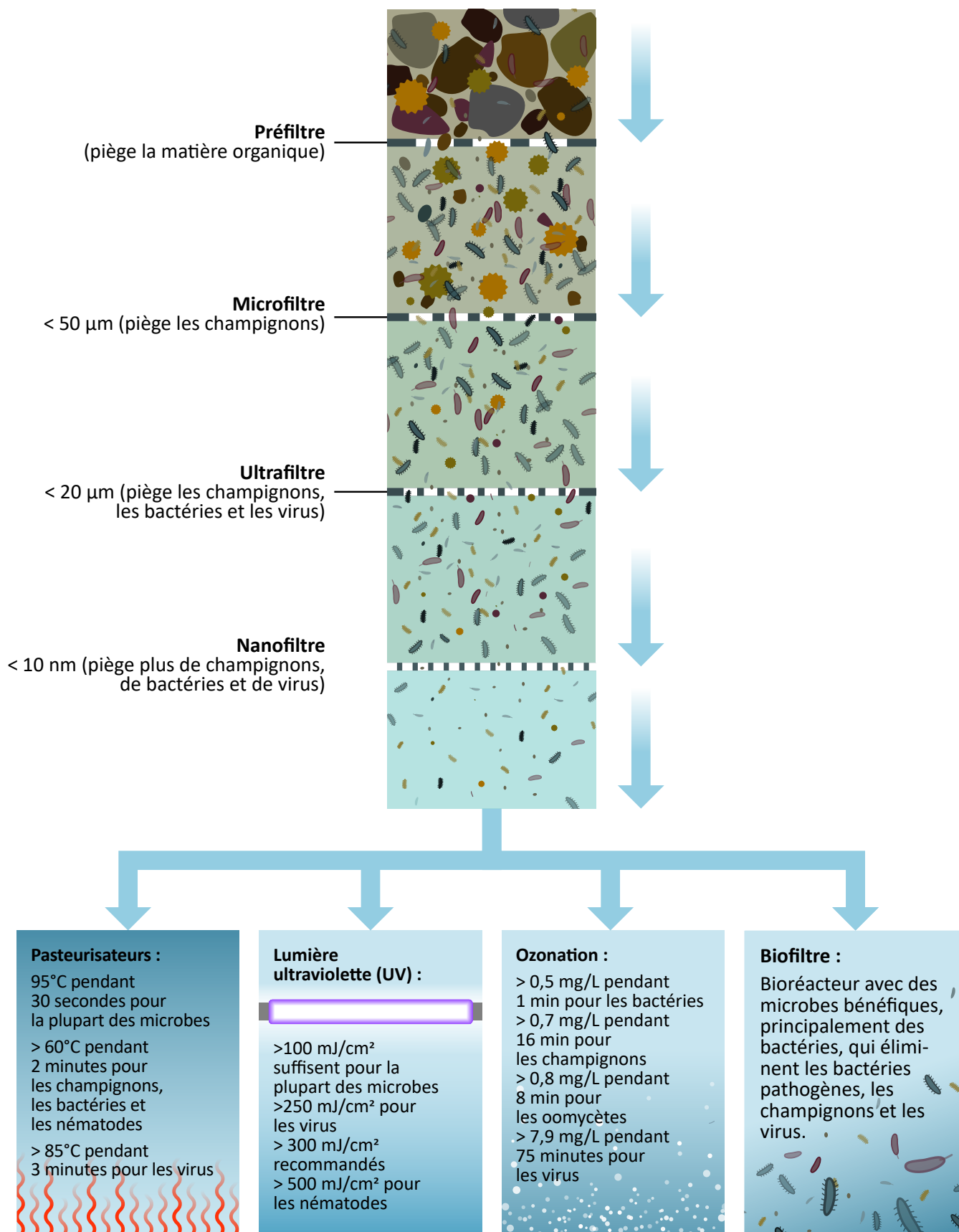


Figure 22. Filtration et désinfection multi-étapes de l'eau recirculée.

services peuvent comprendre des techniques moléculaires qui permettent d'identifier une panoplie d'agents pathogènes à la fois, comme le multibalayage ou le séquençage de l'ADN. Cependant, les résultats positifs des tests moléculaires doivent être interprétés avec prudence, car ils signifient que le matériel génétique (l'ADN ou l'ARN) d'un agent pathogène est présent, mais ils ne peuvent pas indiquer si cet agent pathogène est vivant ou mort. Si un agent pathogène est détecté par un test moléculaire, il doit être vérifié par des essais biologiques (culture ou inoculation de plants d'essai) pour confirmer que l'agent pathogène est vivant.

Références

Ehret, D.L., Alsanius, B., Wohanka, W., Menzies, J.G., Utkhede, R., 2001. « Disinfestation of recirculating nutrient solutions in greenhouse horticulture ». *Agronomie*. 21, 323-339.

Graham, T., Zhang, P., Woyzbun, E., Dixon, M., 2011. « Response of hydroponic tomato to daily applications of aqueous ozone via drip irrigation ». *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 129, 464-471.

Raudales, R.E., Parke, J.L., Guy, C.L., Fisher, P.R., 2014. « *Control of waterborne microbes in irrigation: A review* ». *Agric. Water Manag.* 143, 9-28.

Resource Innovation Institute. 2023. *Best Practices Guide - Water Circularity for Controlled Environment Agriculture (CEA) Operations*.

Stewart-Wade, S.M., 2011. « *Plant pathogens in recycled irrigation water in commercial plant nurseries and greenhouses: Their detection and management* ». *Irrig. Sci.* 29, 267-297.

Takami M., Kobayashi F., Ikeura H., Sato M. 2018. « Disinfection of Ozone Microbubbles Can Cause Morphological Change in *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis* Spores ». *Plant Pathology Journal*. 34:335-340.



CHAPITRE 8

Milieux de croissance

Les milieux de culture doivent répondre à quatre besoins fondamentaux du plant : l'eau, les nutriments, l'oxygène et le soutien des racines. La plupart des producteurs de légumes de serre de l'Ontario sont passés de la culture au sol à la culture hors sol. Aujourd'hui, la plupart des légumes de serre sont cultivés sur laine de roche (55 %) ou sur fibre de coco (35 %). Les 10 % restants sont cultivés dans d'autres milieux tels que la technique de culture sur film nutritif (TCFN), la culture en eau profonde (CEP), les étangs, la mousse, les boulettes d'argile expansée, la tourbe, la sciure et le sol. Les milieux sans sol ne fournissent normalement aucun ou une quantité limitée de nutriments pour la croissance des plants, de sorte que ceux-ci doivent être fournis dans la solution d'engrais. Cette application d'engrais et d'eau à travers un système d'irrigation est ce qu'on appelle **l'irrigation fertilisante**.

La plupart des cultures sur vigne (tomates, concombres, poivrons et aubergines) nécessitent des systèmes de soutien racinaire solides pour la vigne, elles sont donc généralement cultivées dans des matelas de milieux sans sol qui fournissent la base solide. Les cultures

plus compactes (légumes-feuilles, laitue) ne nécessitent pas de système racinaire solide et peuvent être cultivées avec leurs racines dans des récipients plus petits ou des milieux de culture peu profonds sur des tables ou directement dans l'eau à l'aide de systèmes de TCFN, CEP ou d'étangs.

Des niveaux d'oxygène adéquats sont nécessaires pour une bonne respiration et une bonne production d'énergie par le système racinaire. La plupart des milieux sans sol, comme la laine de roche, sont suffisamment poreux pour maintenir des niveaux d'oxygène appropriés. Cependant, lorsque les racines sont cultivées directement dans l'eau, comme dans les systèmes de TCFN, de CEP ou d'étangs, les niveaux d'oxygène dissous (OD) doivent être surveillés. Les niveaux d'OD doivent être maintenus au-dessus de 5 mg/L (parties par million [ppm]). La sursaturation en oxygène jusqu'à 20-30 ppm peut prévenir un stress causé par un manque d'oxygène, également connu sous le nom d'hypoxie. L'hypoxie peut contribuer à une faible productivité et à la mauvaise santé des plants et rendre la culture plus vulnérable aux maladies des racines. Cependant, un taux d'OD trop élevé peut également affecter négativement la croissance des plants.

Culture sur laine de roche

La laine de roche est un milieu de culture artificiel, fait de roche basaltique, de coke et de calcaire. La roche basaltique est fondue dans un four, puis filée en couches successives pour former des matelas. À l'origine, ces matelas servaient à isoler les bâtiments et les tuyaux, mais ils sont maintenant également utilisés comme substrat en horticulture. La laine de roche horticole est fabriquée selon des directives strictes qui garantissent l'obtention d'un produit homogène, d'une densité précise et ayant subi un traitement avec un agent mouillant. Le produit est coupé en dimensions normalisées, puis enveloppé et scellé dans des sacs de plastique (polyéthylène). La laine de roche vient en matelas, en blocs, en micromottes et en granulés. Les granulés sont utilisés tels quels ou ajoutés à la tourbe dans la culture en sacs de tourbe pour former un mélange laine et tourbe. La culture en sacs de granulés n'est pas aussi pratiquée que la culture sur matelas de laine de roche.

La laine de roche horticole :

- est stérile (exempte d'agents pathogènes, de graines de mauvaises herbes, etc.);
- n'a aucune capacité d'échange cationique ou une faible capacité seulement (est inerte et par conséquent n'interagit pas avec la solution nutritive);
- a une grande capacité de rétention d'eau;
- a habituellement un pH initial élevé;
- est légère et facile à manipuler;
- permet un intervalle entre les cultures plus court, car elle peut être retirée rapidement.

La laine de roche est un substrat qui se draine librement. De ce fait, il est important de soigner la disposition du système de culture à l'intérieur de la serre, de manière à garantir un arrosage uniforme de tous les plants. Si le système n'est pas bien conçu (p. ex. si la pente du sol de la serre est inégale), certains sacs peuvent rester trop humides ou trop secs, ce qui limite la croissance des plants et la production de fruits et entraîne un manque d'uniformité de la culture.

Un système de production sur laine de roche de base comprend les éléments suivants :

- une membrane isolante créant une barrière entre la surface du sol et le milieu ambiant;

- un réseau de rigoles surélevées (intégrant un système d'irrigation et de récupération des eaux de percolation [drains]);
- des matelas de laine de roche placés sur les rigoles.

Si le système repose directement au sol, prévoir également :

- une membrane isolante créant une barrière entre la surface du sol et le milieu ambiant;
- une lisière de polystyrène à des fins isolantes (placée au-dessus ou en dessous de la membrane isolante);
- des matelas de laine de roche placés au-dessus de la lisière de polystyrène et de la membrane;
- un système d'irrigation goutte-à-goutte;
- un système de collecte des eaux de percolation.

Dans la culture sur matelas de laine de roche, les semis se font dans des micromottes de laine de roche. Une fois germés, les semis sont ensuite transplantés dans des blocs de laine de roche. Une fois qu'ils ont atteint la taille et le stade souhaités, les plants dans les blocs de laine de roche sont transplantés sur les matelas de laine de roche dans la serre. Cette étape peut prendre jusqu'à 6 à 8 semaines pour les tomates, 3 à 4 semaines pour les concombres et 7 à 9 semaines pour les poivrons. Cette période est plus longue en hiver qu'en été.

Système de rigoles surélevées

Le système de rigoles surélevées est utilisé dans la plupart des nouvelles serres, tandis que de nombreuses installations plus anciennes ont été modernisées pour l'accueillir (Figure 23). Dans ce système, les matelas de laine de roche sont placés dans des rigoles préformées qui sont surélevées à 80-120 cm du sol grâce soit à des supports, soit à des chaînes accrochées à la structure de la serre lorsqu'elle peut supporter cette charge. Les rigoles intègrent un système d'irrigation et de récupération des eaux de percolation.

Le système de rigoles surélevées permet d'insérer une culture intercalaire qu'on sème vers la fin du cycle de la culture déjà en place. La dernière récolte de la vieille culture coïncide avec la première de la nouvelle.



Figure 23. Système de rigoles surélevées.

Avantages des systèmes à rigoles surélevées

- La mise en place est plus rapide pendant la phase de construction, car il n'est pas nécessaire de creuser des tranchées de lessivage au sol.
- Plus grande facilité d'installation des conduites utilisées pour le chauffage ou comme réseau de rails et plus grande facilité d'entretien de la serre du fait que le sol est plat.
- La tubulure principale d'irrigation fertilisante peut être facilement ombragée pour éviter le chauffage par la lumière directe du soleil. Ceci est important, sinon l'augmentation de la température peut réduire considérablement les niveaux d'OD de la solution nutritive.
- Allègement de la tâche :
 - posture plus droite du travailleur;
 - plus grande facilité d'installation des sacs de substrat;
 - plus grande aisance pour mettre en place les plants;
 - travail d'enlèvement des feuilles qui se fait à une hauteur plus pratique;
 - facilité et vitesse de récolte accrues.
- Lutte plus efficace contre les ennemis des cultures :
 - plus grande facilité à surveiller les infections à la base des plants et dans la partie basse des tiges et du feuillage;
 - une meilleure circulation de l'air améliore le microclimat autour du plant et minimise l'incidence des maladies;
 - plus grande facilité à déceler et à réparer les goutteurs défectueux (obstructions ou fuites);

- plus grande facilité d'introduction de mesures de lutte biologique à la base des plants.
- Facilitation de la régie de l'eau dans le milieu de croissance du fait :
 - des matelas qui sont de niveau et qui assurent ainsi une humectation et un drainage uniformes;
 - de l'arrosage qui est plus uniforme, étant donné que tous les goutteurs sont placés de la même façon et que les problèmes, comme les fuites, sont facilement décelés et corrigés;
 - de la facilité à récupérer la solution nutritive pour la faire recirculer.
- Plus grande facilité de nettoyage durant la saison de croissance (résidus de culture) et de retrait de la culture en fin de saison.

Inconvénients des systèmes à rigoles surélevées

- Coût élevé des rigoles.
- Structure de la serre qui doit être conçue pour supporter le poids des rigoles et des cultures.
- Prolifération possible d'algues dans le canal de drainage.
- Moins grande facilité de passer d'une culture à l'autre.

Régie de l'eau

Les matelas de laine de roche, bien qu'ils se drainent librement, peuvent devenir gorgés d'eau si des cycles d'irrigation courts et fréquents sont effectués ou si les trous de drainage ne sont pas coupés correctement pour leur permettre de se drainer librement. Le drainage est particulièrement important dans les premiers stades de croissance et sous un faible rayonnement lumineux. Placez les sacs de manière à ce qu'ils soient de niveau et uniformément espacés, et assurez-vous que les trous de drainage sont coupés avec précision, dimensionnés et situés correctement pour un drainage optimal.

Une fois les sacs placés dans la serre, ils sont saturés d'une solution nutritive complète. Il faut que chaque sac soit complètement saturé si l'on veut activer l'agent mouillant et faire en sorte que le matelas entier constitue un milieu

propice à l'enracinement. Après la plantation, coupez une fente dans le sac du bas vers le haut pour permettre le drainage. Cette opération se fait habituellement dans les 24 à 48 heures qui suivent la plantation. Arroser les plants pendant ½ heure, puis n'arroser à nouveau que durant les jours ensoleillés durant les 2 à 3 jours suivants. On s'assure ainsi de la pénétration rapide des racines dans le matelas et on laisse la chance au matelas de s'assécher.



ATTENTION

Un arrosage trop abondant risque de stimuler à outrance la croissance végétative et, du coup, de rendre les plants plus sensibles aux maladies.



ATTENTION

La laine de roche doit être plus ou moins sèche selon les caractéristiques des matelas achetés. Suivre les recommandations du fabricant.

Par la suite, on arrose au besoin en décidant de la quantité d'eau en fonction des facteurs suivants :

- stade de croissance des plants;
- taille du plant;
- niveaux d'éclairage;
- températures dans la serre et dans les matelas;
- humidité relative ou déficit de tension de vapeur dans la serre;
- importance de la circulation d'air.

En général, on utilise 100 mL de solution nutritive/cycle. Par contre, ce volume peut varier selon les suivants :

- le type de laine de roche;
- le stade de croissance des plants;
- la période de l'année;
- la conductivité électrique (CÉ), qui constitue une mesure de la concentration totale de sels dissous ou d'ions dans la solution;
- le pourcentage de drainage.

Pour décider des arrosages, on surveille la CÉ dans le matelas et on détermine le pourcentage de percolation. En outre, surveillez le pourcentage de lixiviat. Le taux de percolation recommandé est généralement de 20 à 30 %.

Le moyen le plus simple pour mesurer manuellement le taux de percolation consiste à recueillir dans un contenant gradué de 4 L la solution débitée par un seul goutteur. Utilisez un contenant identique pour recueillir les eaux de percolation provenant de quatre plants irrigués par le goutteur en question. Comparez les volumes. S'ils sont les mêmes, le taux de lixiviation était de 25 %. Vous pouvez également recueillir la solution de deux goutteurs et les eaux de percolation de huit plants.

Consigner quotidiennement les volumes des eaux de percolation et d'arrosage ainsi que le taux de conductivité électrique (CÉ) et le pH des eaux d'irrigation et de percolation. Ces données aident à déterminer la stratégie d'irrigation à suivre. Si la CÉ augmente, cela indique qu'il n'y a pas eu suffisamment d'eau appliquée en fonction des conditions de la journée en question. Inversement, une CÉ à la baisse indique que les plants ont reçu trop d'eau.

Il n'est habituellement pas recommandé d'arroser la nuit. Commencer les cycles d'irrigation 1 à 2 heures après le lever du jour et les faire se terminer 1 à 2 heures avant le coucher du soleil. Soumettre les matelas à une mesure du taux de percolation après le premier cycle d'irrigation. S'il y a des eaux de percolation après le 1^{er} cycle, les sacs sont trop humides. Retardez l'heure de démarrage de l'irrigation ou cessez l'irrigation plus tôt pour raccourcir la durée de l'irrigation. S'il n'y a pas d'eaux de percolation après le 3^e cycle, les sacs sont trop secs. Il faut alors poursuivre l'irrigation plus tard en soirée ou la commencer plus tôt le matin.

Un programme d'irrigation qui n'est pas correctement mis en place peut diminuer la production et augmenter l'incidence des maladies.

Si les matelas sont trop mouillés, s'attendre à :

- une mauvaise aération des matelas;
- un ralentissement de la croissance végétative;

- un mauvais enracinement;
- une plus grande vulnérabilité aux maladies des racines.

Si les matelas sont trop mouillés, s'attendre à :

- des poils absorbants endommagés;
- une CÉ élevée;
- des problèmes d'absorption et de diffusion du calcium menant à la nécrose apicale chez la tomate et le poivron, à la brûlure ou à l'enroulement des jeunes feuilles de concombre;
- une croissance ardue, des plants plus grêles;
- des feuilles foncées, plus petites et épaisses.

Pour enclencher et commander les cycles d'irrigation, les ordinateurs de contrôle utilisent une minuterie, un plateau de démarrage, l'intensité du rayonnement lumineux, un appareil de mesure de la teneur en eau ou une balance ou encore une combinaison de ces méthodes.

On peut évaluer la teneur en eau du matelas de laine de roche, sa CÉ et sa température au moyen d'appareils vendus dans le commerce. Ces appareils sont portatifs et peuvent prendre des mesures à partir de plusieurs matelas à n'importe quelle heure du jour ou de la nuit. Les modèles plus récents sont installés à demeure et assurent la transmission des données enregistrées à un ordinateur qui modifie en conséquence le calendrier d'irrigation.

Calendrier de fertilisation

En règle générale, les matelas de laine de roche ont tendance à avoir un pH élevé à leur première utilisation. Pour compenser, il faut appliquer une solution nutritive ayant un pH de 5,0-5,5. Il faut habituellement un certain temps avant que le matelas de laine de roche ne reste au pH souhaité de 5,5 à 6,5, selon la culture. Comme la laine de roche est un matériau inerte, il faut toujours appliquer une solution nutritive complète.

Fibre de coco

La fibre de coco est un substrat de culture relativement nouveau en Ontario. Il est devenu populaire au cours des dernières années en raison de son prix compétitif et de sa facilité d'élimination à la fin de la saison de culture. Il s'agit d'un substrat organique constitué de résidus de l'industrie de la fibre de coco. Les

longues fibres provenant de l'enveloppe fibreuse du coco sont retirées et les matières résiduelles sont passées à travers un tamis et classées. Elles sont ensuite façonnées en boulettes de diamètres variés. Ces boulettes ont une capacité de rétention d'eau élevée, une porosité élevée et une capacité d'échange de cations modérée à élevée. Le matériau a un pH de 5,6 à 6,5 et une densité apparente d'environ 82 kilogrammes par mètre cube (kg/m³). Une fois traité pour le débarrasser du surplus de sels, le substrat est asséché, comprimé en briques et emballé dans des sacs de plastique (polyéthylène) avant son expédition.

La fibre de coco s'utilise de la même façon que la laine de roche, sauf que :

- Les sacs doivent être mis à tremper dans une solution nutritive ayant une teneur en calcium d'environ 10 % plus élevée et une teneur en potassium d'environ 10 % plus faible que celle dont on se sert pour l'irrigation fertilisante de la laine de roche.
- Avant de recevoir les plants, la fibre de coco doit être entièrement saturée afin que les fibres puissent retrouver leur aspect naturel.
- Certains fournisseurs vendent la fibre de coco dans des sacs précoupés; veiller à leur saturation complète.
- La régie de l'eau peut varier selon les caractéristiques de la fibre de coco.

La capacité de rétention d'eau et la disponibilité de l'eau dépendent de la taille, de la forme et de l'uniformité des particules dans les briques de fibre de coco. Dans certains cas, les matelas de particules mélangées peuvent favoriser la fructification parce qu'ils réclament des arrosages fréquents, ce qui constitue un avantage quand les niveaux de luminosité sont faibles. Dans d'autres cas, les mélanges de particules peuvent favoriser la croissance végétative des plants, ce qui nécessite l'ajustement des apports d'eau pour éviter les arrosages excessifs. Cette variabilité s'observe d'une marque à l'autre, mais aussi, dans certains cas, d'une brique à l'autre.

La fibre de coco se réhydrate facilement et se draine rapidement, ce qui facilite la conduite de la culture. À la fin du cycle de culture, la fibre de coco peut être compostée.

Système de culture sur film nutritif nutritif

Le système de culture sur film nutritif consiste à faire circuler continuellement sur les racines un mince filet ou film de solution nutritive (Figure 24). Il s'agit d'un véritable système hydroponique, puisque les racines nues baignent dans une solution nutritive recyclée dans un système fermé. Cette technique permet de réaliser des économies d'engrais et d'eau et est plus écologique.



Figure 24. Technique de culture sur film nutritif.

Les éléments de base du système sont les suivants : le bassin collecteur et les réservoirs et pompes qui l'alimentent, les rigoles et le réseau de retour de la solution. La solution nutritive est pompée du bassin collecteur jusqu'à la tête des rigoles, s'écoule par gravité dans les rigoles jusqu'au tuyau de retour qui l'amène au bassin collecteur. Les rigoles ont une pente de 1 à 2 % pour faciliter l'écoulement de la solution nutritive.

Bassin collecteur

Le réservoir d'un système de TCFN est situé sous le niveau du sol pour permettre un flux de retour de la solution nutritive alimenté par gravité. Le bassin collecteur peut être fait :

- de blocs de béton;
- de béton coulé;
- de morceaux de béton cimentés enfouis dans le sol, avec un plancher en ciment;

- de réservoirs de plastique rigide enfouis dans le sol ou insérés dans des cavités en béton;
- d'un puits avec des parois de bois recouvertes d'une toile de piscine.

Si du béton est utilisé, il doit être peint avec une peinture à base de caoutchouc, non phytotoxique (c.-à-d. non nocive pour la culture) pour protéger le béton de la solution nutritive et pour inhiber la capacité du béton à élever le pH de la solution nutritive.

Les réservoirs sont généralement conçus pour avoir une capacité de 5 500 L/0,5 ha avec 4 000 à 4 500 L d'eau dans le réservoir. Pendant ce temps, les systèmes de TCFN traditionnels sont conçus pour permettre à 13 500 à 13 750 L/0,5 ha de solution nutritive de circuler dans la serre. Il faut prévoir un moyen d'entreposer cette eau en cas de panne électrique. Le bassin collecteur est muni d'une arrivée d'eau fraîche automatique, qui assure l'alimentation du bassin en eau fraîche aussitôt que l'eau du bassin s'abaisse sous un certain niveau.

Système de pompage

Le système de pompage doit pouvoir débiter un grand volume d'eau (au moins 2 L/min/goutteur) à basse pression, être fiable et équipé de turbines ou de composantes en acier inoxydable ou en plastique. Habituellement, les systèmes sont conçus pour répondre aux besoins d'une station de pompage de 5 chevaux-vapeur (HP) par acre (0,4 ha). Il faut alors aussi installer une pompe de secours de 5 HP, équipée d'un capteur qui en assure la mise en marche automatique.

Un système plus économique consiste à installer trois pompes de 2 HP chacune, à les monter en parallèle et à les faire fonctionner ensemble. Si l'une des pompes tombe en panne, les deux autres parviennent à faire circuler suffisamment de solution pour réduire au minimum les répercussions sur la culture pendant la réparation.

Par mesure de précaution, garder un moteur de secours. Étant donné que toute panne d'électricité peut ruiner la culture, l'installation doit être équipée d'un groupe électrogène de secours capable de fournir suffisamment d'électricité pour faire fonctionner les pompes et

autres appareils indispensables à l'exploitation (p. ex., appareils de chauffage, ventilateurs et ordinateurs).

Il y a un avantage supplémentaire au fait d'utiliser trois pompes de 2 HP chacune montées en parallèle : la capacité de pompage supplémentaire permet aux producteurs d'augmenter le taux d'écoulement de la solution de 2 L/min/rigole, au besoin. De plus, la capacité supplémentaire peut être utilisée pour faire fonctionner les systèmes de chauffage et de pasteurisation, oxygéner la solution nutritive et amener la solution nutritive au système de surveillance en ligne. De plus, cette solution rend superflue l'installation d'une pompe supplémentaire pour ces opérations.

Régulateurs de pH et de CÉ

Le pH et la CÉ de la solution sont continuellement surveillés par des capteurs en ligne. Si la lecture s'écarte du point de consigne établi par le producteur, les contrôleurs du pH et de la CÉ déclenchent automatiquement les pompes de dosage de la solution nutritive jointes au système. Le système ajoute continuellement de l'engrais, des acides et des bases, au besoin. Les régulateurs sont dotés d'un interrupteur qui prévient le surdosage. Il s'agit d'une caractéristique de sécurité importante, car un excès d'engrais ou d'acide ou de base peut nuire à la culture. Par mesure de sécurité, installer un second ensemble de régulateurs de pH et de CÉ pour vérifier les lectures des régulateurs principaux.

Un système informatisé d'injection d'engrais peut aussi être utilisé pour surveiller et ajuster la solution nutritive. Un tel système a l'avantage :

- de surveiller plusieurs bassins collecteurs à partir d'un seul appareil;
- de maintenir l'intégrité des solutions nutritives dans chaque système de culture sur film nutritif;
- d'assurer le maintien dans chaque système de différents calendriers de fertilisation (p. ex., adaptés au stade de la culture).

Commande de la température

La température optimale de la solution varie entre 18 et 21°C. Habituellement, la température de la solution est fonction de celle de l'air :

la température de la solution nutritive augmente à mesure que l'air se réchauffe au cours de la journée. De même, quand la température de l'air s'abaisse la nuit, la solution nutritive se refroidit également. Une source de chauffage d'appoint est donc nécessaire pour maintenir constante la température de la solution, surtout quand il y a ajout d'eau fraîche.

Des serpentins de réchauffage en acier inoxydable sont placés dans le bassin collecteur ou, dans la plupart des cas, dans un petit réservoir auxiliaire alimenté par la pompe principale. La pompe principale fournit la solution nutritive au réservoir auxiliaire par l'intermédiaire d'une boucle latérale. Une fois la solution chauffée, on la laisse retourner dans le réservoir.

Au fur et à mesure que la température de la solution nutritive augmente, la quantité d'oxygène dissous dans la solution nutritive diminue. Ce phénomène peut être problématique l'été, surtout au démarrage d'une culture d'automne. En effet, comme les jeunes plants n'apportent pas d'ombrage suffisant, le rayonnement solaire chauffe la solution nutritive. Il est ainsi fréquent d'observer des températures aussi élevées que 30°C. De l'eau douce ou des refroidisseurs peuvent être utilisés pour refroidir la solution nutritive.

Désinfection

Une boucle de désinfection ajoutée au système de culture sur film nutritif siphonne 25 % de la solution nutritive pour la désinfecter partiellement. La désinfection complète est déconseillée, car la stérilité favorise la prolifération rapide de la flore microbienne. Par contre, une désinfection partielle réduit la population de microbes dans la solution sans l'éliminer, ce qui assure un équilibre entre les populations de microorganismes utiles et nuisibles dans la solution.

La plupart des producteurs installent un système de désinfection aux rayons ultraviolets (UV) qui permet à 25 % de la solution nutritive de passer à travers les lampes UV et de retourner dans le réservoir. On peut aussi désinfecter la solution nutritive par un traitement à l'ozone. Toutefois, ce type de traitement requiert des systèmes spécialisés et adaptés pour être efficace sans

nuire aux cultures. Bien que la filtration lente sur sable soit une technique efficace, elle n'est pas couramment utilisée pour les systèmes de TCFN, car de très grands systèmes seraient nécessaires pour gérer le volume d'eau et le débit requis pour traiter efficacement la solution nutritive.

Aération

Il faut aérer la solution nutritive pour assurer l'apport d'oxygène aux racines. Une hauteur de chute suffisante entre le tuyau de retour et le niveau de solution dans le bassin collecteur assure une bonne agitation et favorise l'oxygénation de la solution. Une boucle d'aération, utilisant un système venturi, améliore également l'oxygénation en forçant l'air dans la solution nutritive. L'injection d'oxygène dans la solution nutritive à l'aide de systèmes d'ozone ou de systèmes à bulles est un autre moyen de maintenir des niveaux d'oxygène adéquats.

Réseau d'alimentation et de retour de la solution nutritive

Le réseau d'alimentation de la solution nutritive doit être conçu de manière à garantir l'uniformité d'alimentation des rigoles (2 L/min/rigole) (Figure 25). Un collecteur principal de 75 mm provenant du groupe de pompage fournit la solution nutritive à une sous-tête de 37,5 à 50 mm. La sous-tête délivre ensuite la solution à une sous-tête de 19 à 25 mm dans chaque zone, à partir de laquelle un tube flexible de 4 mm délivre au moins 2 L de solution nutritive par minute et par rigole. Un système bien conçu nécessitera peu ou pas d'équilibrage entre les zones pour assurer une distribution uniforme de l'eau. Toutes les composantes du réseau sont en polychlorure de vinyle (PVC). On évite ainsi les risques de phytotoxicité associés à la libération d'ions zinc consécutive à la corrosion découlant du contact de tuyaux galvanisés avec la solution nutritive.

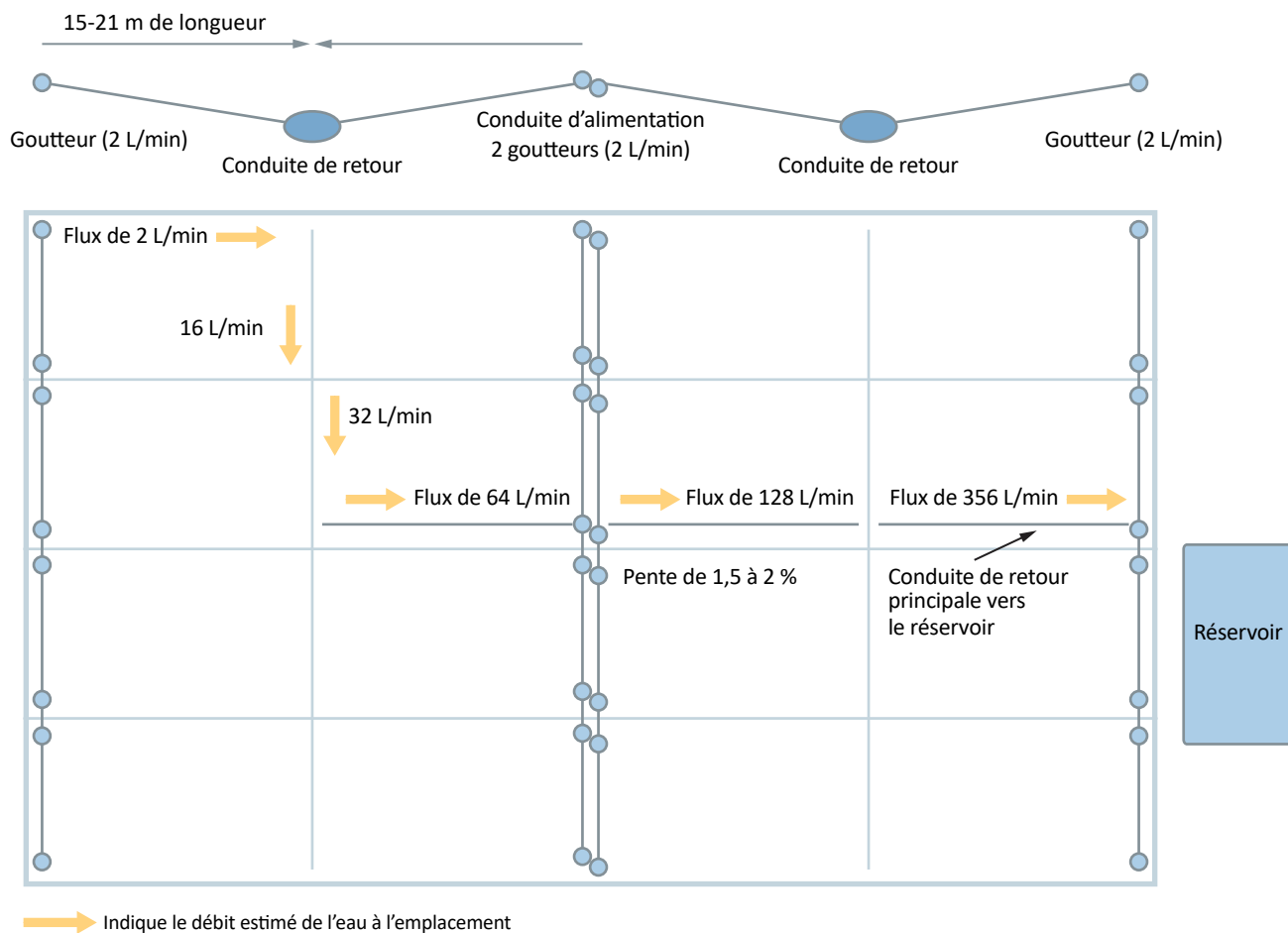


Figure 25. Exemple de disposition pour les goutteurs pour la technique de culture sur film nutritif et conduite de retour.

Les dispositifs de prise d'eau des pompes se trouvent habituellement près du fond du bassin collecteur et sont pourvus d'un filtre-panier et d'un clapet antiretour unidirectionnel. Ces caractéristiques sont essentielles, car elles évitent d'avoir à amorcer les pompes quand le groupe électrogène rétablit le courant après une panne électrique.

La conduite de retour est enterrée dans le sol et se compose d'un tuyau d'égout de 10 cm, durable, peu coûteux et facile à installer. Des trous pratiqués dans le tuyau ou aux jonctions en « T » faites à chaque zone de retour de rigole permettent à la solution de s'écouler de la rigole dans le tuyau de retour. La solution s'écoule par gravité jusqu'au bassin collecteur. Une pente de 0,5 % suffit habituellement. Il doit y avoir une hauteur de chute suffisante entre le tuyau de retour et la surface de la solution nutritive pour que la solution de retour se mélange bien au contenu du bassin collecteur. L'agitation accrue améliore l'aération de la solution, tandis que les extensions placées à l'extrémité de la ligne de retour peuvent également augmenter l'agitation, améliorant encore l'aération. Un filtre grossier (p. ex. un bas de nylon placé à l'ouverture) piège les racines ou autres débris qui pourraient obstruer les turbines de la pompe.

Rigoles

Il existe de nombreux types de rigoles. Elles vont des rigoles d'aluminium avec couvercles de plastique, aux rigoles de plastique rigide préformées munies de volets, en passant par les tubes de polyéthylène de 6 mm d'épaisseur, blancs d'un côté et noirs de l'autre. Dans tous les cas, la rigole vise à fournir un canal pour que la solution nutritive s'écoule et que les racines y poussent. Le système le moins cher est composé d'un polytube de 6 mm posé sur du polystyrène de 4 cm d'épaisseur et de 20 cm de largeur. Un sillon large et peu profond courant le long de la lisière de polystyrène amène la solution nutritive vers le milieu de la rigole. Ce détail est particulièrement important dans les premiers stades de croissance si l'on tient à ce que tous les plants reçoivent de la solution nutritive. Cependant, un canal trop profond amène une mauvaise aération, ce qui diminue son efficacité du fait de la réduction du taux

d'oxygène offert aux racines, et favorise les maladies et le dépérissement des racines.

Idéalement, la rigole devrait avoir une pente de 1,5 à 2 %, une longueur de 15 m et une largeur de 30 cm à la base. Une longueur de rigole supérieure à 21 m oblige à modifier la pente et le taux d'écoulement.

Phytotoxicité

Toutes les composantes du système de culture sur film nutritif doivent être non phytotoxiques. Les composantes de métal (tuyaux galvanisés et de cuivre) sont à proscrire à cause de la corrosion du métal et de la libération d'oligo-éléments, comme le zinc ou le cuivre, qui s'accumulent et atteignent des niveaux toxiques. Les composantes de plastique des conduites d'irrigation ainsi que les rigoles doivent être non phytotoxiques. Les composantes faites de certains plastiques flexibles sont très toxiques pour les plants. Évitez d'utiliser de l'eau et des engrais contenant du sodium (Na) et du chlorure (Cl), car ils peuvent facilement augmenter le Cl et le Na à des niveaux phytotoxiques et la solution nutritive devra être éliminée plus fréquemment.

Culture sur sol

Le nombre de producteurs utilisant ce substrat a diminué. Cependant, les exploitations biologiques et certaines petites exploitations serricoles continuent de produire des légumes de serre en utilisant le sol. L'irrigation goutte-à-goutte ou au moyen de tuyaux perforés est fréquemment utilisée dans les serres où se pratique la culture sur sol. Les facteurs à prendre en compte lors de l'utilisation de la culture du sol comprennent : le type de sol, le drainage, le lessivage, la pasteurisation du sol, la matière organique, le contrôle du pH et l'irrigation goutte-à-goutte.

Types de sols

Pour atteindre une productivité maximale, les producteurs devraient avoir un sol bien aéré, bien drainé, riche en éléments nutritifs et en matière organique, et exempt d'agents pathogènes. Les sols les plus susceptibles de convenir sont les loams, les loams sableux et certains loams limoneux. D'autres types de sols

peuvent être employés, quoiqu'ils requièrent une gestion adaptée et obligent à engager des coûts accrus pour atteindre une productivité maximale. Par exemple, pour réussir la production hivernale hâtive dans une argile lourde, il faut installer des drains agricoles, enrichir le sol en matière organique avant la saison de culture pour permettre aux particules de sol de former des agrégats, et faire une bonne gestion de l'eau et des éléments nutritifs. Des sols sableux ayant une faible capacité de rétention d'eau requièrent des arrosages fréquents (avec fertilisation), ce qui augmente les risques de contamination de la nappe d'eau souterraine. On peut remédier à ce problème en installant un système qui récupère et recycle les eaux de percolation.

Drainage

Un sol bien drainé est le meilleur sol pour la production de légumes de serre. Un réseau de drains agricoles dans les planches au sol assure l'évacuation des eaux de percolation. Communiquez avec un fournisseur local de drains agricoles pour obtenir de l'aide pour la conception du système de drainage. Il est habituellement conseillé d'installer des drains de 10 cm de diamètre, de les enfouir à 35 cm de profondeur, de les espacer de 45 à 60 cm les uns des autres et de leur ménager une pente de 10 cm sur 150 m.

Lessivage du sol

Le sol doit être irrigué avant la plantation pour qu'il donne son plein rendement. La quantité d'eau requise varie selon le type de sol et sa teneur en eau. En général, il faut de 20 à 50 L d'eau/m². Le lessivage (100 L/m²) peut être indiqué dans certains sols, surtout ceux qui ont été pasteurisés à la vapeur, afin d'abaisser les concentrations élevées d'ammonium et de manganèse qu'ils renferment.

Pasteurisation du sol

La plupart des sols renferment des agents pathogènes (bactéries et champignons) ainsi que des graines de mauvaises herbes et des insectes. La pasteurisation du sol est un bon mécanisme de lutte contre les ravageurs et les agents pathogènes. Le sol doit être bien meuble pour faciliter une pénétration uniforme et rapide de la vapeur ou du fumigant. Les grosses mottes et les résidus de culture mal décomposés (tiges et racines) peuvent nuire à la pénétration.

Dans des conditions idéales, la plupart des organismes, sauf les virus, sont détruits par une élévation de la température à 60°C pendant 30 minutes (Tableau 13). Par contre, si l'on chauffe le sol à plus de 82°C, on éliminera aussi les organismes utiles, ce qui rendra le sol stérile et donc plus vulnérable encore qu'auparavant aux infections.

Voici d'autres effets secondaires indésirables :

- libération excessive d'ammoniac;
- toxicité en manganèse;
- destruction de la matière organique;
- teneur totale en sels plus élevée.

Tableau 13. Temps et température requis pour détruire les mauvaises herbes, les ravageurs et les organismes pathogènes

Organisme	Temps (min)	Température (°C)
Mauvaises herbes (la plupart)	15	70-80
Insectes et acariens	20	60-71
Bactéries (la plupart)	10	60
<i>Fusarium</i>	30	57
<i>Botrytis</i>	15	55
<i>Nématodes</i>	15	55
<i>Rhizoctonia</i>	30	50
<i>Sclerotinia</i>	5	50
<i>Pythium</i>	40	46

Source : W.R. Jarvis. « Managing Diseases in Greenhouse Crops », APS Press, 1992.

On peut pasteuriser les sols des serres en injectant de la vapeur dans les drains agricoles. Pour une pasteurisation plus efficace, il est bon de recouvrir la surface du sol d'une membrane de plastique et d'emprisonner la vapeur dans le sol. Si l'état des drains agricoles empêche de recourir à cette méthode, on peut injecter la vapeur directement sous une bâche en plastique spécialement conçue à cette fin en suivant les étapes suivantes :

1

On enfouit les bords de la bâche jusqu'à 1012 cm de profondeur afin que la vapeur, injectée à une pression de 4148 kPa (67 psi), ne puisse s'échapper.

2

On surveille ensuite la température du sol pour veiller à ce que celle-ci permette une bonne pasteurisation sans surchauffer le sol. Toujours lessiver le sol après une pasteurisation à la vapeur.

On peut aussi employer des fumigants chimiques, bien que le choix soit restreint. Suivre le mode d'emploi indiqué sur l'étiquette pour connaître la dose, la durée du traitement et la période nécessaire à la ventilation afin que ces produits soient pleinement efficaces et utilisés en toute sécurité.

Matière organique

Un niveau élevé de matière organique aide à maintenir une structure de sol stable et améliore la capacité de rétention d'eau et l'aération du sol. La tourbe grossière à des taux aussi élevés que 500 m³/ha peut être incorporée dans de nouveaux sols pour améliorer leur état. La tourbe est acide (pH de 4,0), elle abaisse ainsi le pH du sol. Ceci est un avantage pour les sols alcalins, mais doit être corrigé dans les sols acides en ajoutant de la chaux (5 kg de calcaire/m³ de tourbe).

De plus, il faut chaque année enrichir le sol de matière organique à raison de 100 m³ de tourbe/hectare. On doit incorporer la tourbe et la chaux au sol avant les principales opérations de travail du sol. On peut incorporer du fumier composté pour enrichir le sol de matière organique, mais l'on s'expose alors à une contamination du sol par des mauvaises herbes et des herbicides qui peut entraîner de lourdes pertes.

Maîtrise du pH

Les fruits et légumes de serre poussent raisonnablement bien dans une large gamme de niveaux de pH du sol (5,5-7,5), mais un pH de 6,0-6,5 pour les sols minéraux et de 5,0-5,5 pour les sols organiques est généralement considéré comme optimal. Pour augmenter le pH du sol, utiliser du calcaire calcitique broyé, à raison de 3 tonnes/ha pour chaque tranche de 0,5 d'augmentation du pH souhaitée, cette dose étant valable dans la plupart des sols légers.

L'ajout de tourbe au sol pour modifier les taux de matière organique abaisse le pH des sols à pH élevé. Le pH du sol peut également être réduit en ajoutant du soufre élémentaire (fleurs de soufre) à raison de 50 à 100 kg/ha pour chaque unité de 0,5 à 1,0 de diminution du pH ou en appliquant du soufre ordinaire au sol et en l'incorporant dans les 15 à 30 cm supérieurs du sol. Effectuez ces travaux plusieurs semaines avant les semis, en gardant à l'esprit que la réaction se produit plus lentement dans des sols froids. La quantité de soufre nécessaire varie entre les sols, en fonction du pouvoir tampon (capacité d'échange) et du pH initial du sol.

Le pH du sol revêt une plus grande importance dans la zone racinaire que dans les allées. Il est facile de rectifier le pH dans la zone immédiate des racines en irriguant la culture au goutte-à-goutte avec une solution nutritive complète au pH ramené à 5,5 grâce à de l'acide phosphorique ou de l'acide nitrique. Une telle solution garde les conduites et les goutteurs propres, en plus d'abaisser le pH dans la zone racinaire et de stimuler du même coup la croissance.

Irrigation goutte-à-goutte

Un système d'irrigation goutte-à-goutte :

- permet de régler les apports d'eau et d'engrais à la culture;
- réduit le taux d'humidité dans la serre;
- permet d'utiliser un film de plastique blanc (polyéthylène) comme paillis réfléchissant la lumière;
- garde les légumes et les fruits propres.

Le système d'irrigation goutte-à-goutte est conçu pour acheminer la solution nutritive à chaque plant, à raison de 2 L/h/plant, grâce à une série de tuyaux qui débouchent sur des goutteurs. Une solution nutritive renfermant tous les engrais nécessaires est appliquée 3 à 4 fois par jour pour répondre aux besoins du plant en éléments nutritifs et en eau. Le type et la quantité d'engrais et le volume d'eau appliqué dépendront des facteurs suivants :

- le type de culture cultivée;
- le stade de la culture;
- le moment de la saison;

- les niveaux d'éclairage;
- la température de la serre;
- la capacité de rétention d'eau du sol.

Chaque jour, évaluer les conditions du milieu de culture en prélevant un échantillon à 10 cm du plant et à 10-15 cm sous le niveau du sol pour déterminer le début et la durée du cycle d'irrigation. Les mesures du pH et de la conductivité électrique (CÉ) de cet échantillon sont aussi utiles pour déterminer les concentrations d'éléments nutritifs dans le sol. Les valeurs idéales se situent dans la fourchette de 5,5-6,5 pour le pH et de 0,9-1,2 mS/cm pour la CÉ. L'information que procurent ces tests rapides aide à déterminer la quantité d'engrais et d'eau dont les plants ont besoin.

Une analyse de sol faite en laboratoire à partir d'un échantillon composite représentatif du sol qu'on retrouve en plusieurs points de la serre facilite l'établissement du calendrier de fertilisation. Au démarrage de la culture, il est bon de faire analyser le sol chaque semaine. Plus tard dans le cycle de culture, l'analyse peut être faite aux 2 à 3 semaines. Une fréquence plus grande s'impose si des problèmes surviennent dans la culture végétale.

Les [normes biologiques canadiennes](#) de l'Agence canadienne d'inspection des aliments doivent être consultées pour la production biologique.

Gestion intégrée de la zone racinaire (GIZR)

L'expression **zone racinaire** fait référence à l'environnement où les racines résident dans un système de culture hors sol. La zone racinaire des plants poussant dans le système de culture de laine de roche susmentionné comprend à la fois le bloc de laine de roche et le sac; pour les systèmes TCFN, il s'agit de toute la solution nutritive dans le bac. Quel que soit le système de culture (p. ex. laine de roche ou TCFN) utilisé, pour maintenir une culture saine et productive, il est essentiel de fournir à la zone racinaire du plant un environnement contenant suffisamment d'eau, de nutriments, d'oxygène dissous (OD), une température optimale et exempt d'agents pathogènes des plants.

Tous ces éléments de la zone racinaire sont interconnectés et influencés par d'autres facteurs tels que l'environnement de croissance. Les modifications apportées à un élément peuvent affecter les autres. Par exemple, un arrosage trop fréquent ou en trop grande quantité peut entraîner une carence en oxygène de la zone racinaire, et une fertilisation insuffisante peut entraîner des carences en eau et en nutriments. La carence en oxygène peut inviter des agents pathogènes tels que *Pythium* à provoquer le pourridié pythien. Les décisions d'arrosage dépendent également du milieu de culture utilisé, du stade de développement du plant et de l'environnement de culture. Le plant doit être arrosé plus fréquemment lorsqu'on utilise un milieu poreux, ou des niveaux de lumière élevés, et vice versa. La GIZR prend en compte tous les facteurs qui peuvent influencer les éléments de la zone racinaire (p. ex. l'eau, les nutriments et l'OD), leurs relations les uns avec les autres et leurs relations avec les autres facteurs tels que la taille et le stade de développement du plant, le microclimat et les milieux de culture. Par conséquent, pour fournir à la plante une zone racinaire optimale, une approche de GIZR est indispensable.

Références

Y Zheng, L Wang, M Dixon. *An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato*. Scientia Horticulturae, 113(2), 162-165.

Y. Zheng, 2020. *Advances in horticultural soil culture*. (p. 22) [Taylorfrancis.com](https://www.taylorfrancis.com).

Y. Zheng, 2019. « *Integrated rootzone management: Is it key to production success?* » [Greenhouse Canada](https://www.greenhousecanada.com).



CHAPITRE 9

Éclairage supplémentaire pour la production hivernale

La demande du marché pour les fruits et légumes cultivés localement toute l'année a conduit à l'adoption de technologies d'éclairage pour la production alimentaire hivernale dans les serres et les fermes verticales en Ontario. Dans la présente section, nous passerons en revue certaines des recherches sur l'éclairage menées au Centre de recherche et de développement de Harrow d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (Harrow, Ontario) au cours des dernières années. Les recommandations généralisées pour l'intensité lumineuse, la **photopériode** et l'**intégrale de lumière quotidienne (DLI)** sont résumées dans le [Tableau 15](#) pour la production commerciale en serre utilisant un éclairage au plafond, des lampes à vapeur de sodium à haute pression (SHP), des diodes électroluminescentes (DEL) ou un système hybride de lampes à vapeur de SHP et de DEL. Cette section met également en évidence les études menées à Harrow pour tester différentes combinaisons de recettes d'éclairage au plafond, d'éclairage d'appoint

et de longues photopériodes dynamiques et de faible intensité pour la production hivernale de concombres, de tomates, de poivrons et de micropousses. Vous trouverez des renseignements détaillés sur les recettes d'éclairage utilisées dans les études et leurs résultats. Dans l'ensemble, l'inclusion de l'éclairage aux LED avec l'éclairage au plafond à lampes à vapeur de SHP a stimulé le volume de production hâtive dans les concombres et de petites doses de rayonnement rouge lointain avec un éclairage à DEL et à lampes à vapeur de SHP ont été bénéfiques pour la production de tomates et de poivrons d'hiver. Des recettes d'éclairage dynamique pour de longues photopériodes (jusqu'à 24 heures) pour la production en serre de tomates, de concombres et de poivrons en hiver et de micropousses dans des fermes verticales ont également été définies. La prochaine étape consiste à intégrer les renseignements tirés de la recherche sur l'éclairage dynamique à longue photopériode dans des programmes de contrôle dynamique de l'éclairage afin de réduire considérablement la facture énergétique et des luminaires.

Renseignements généraux

La croissance impressionnante du secteur des serres de fruits et légumes de l'Ontario au

cours de la dernière décennie n'aurait pas été possible sans les progrès de la recherche et des technologies d'éclairage. Des luminaires plus efficaces, tels que les DEL et les nouvelles lampes à vapeur de SHP à double extrémité, ont permis aux producteurs de prolonger leurs saisons de croissance jusqu'aux mois sombres de l'hiver de manière économiquement durable. La capacité des lumières DEL à être ajustées à différentes intensités lumineuses et gammes de spectres a changé la donne. Cela a permis aux producteurs et aux chercheurs d'expérimenter différentes recettes d'éclairage pour optimiser l'environnement lumineux de leurs cultures.

Avant la commercialisation des lampes à DEL, les lampes à vapeur de SHP étaient utilisées uniquement comme plafonniers pour la production de légumes en serre, car

la température de fonctionnement élevée des ampoules à vapeur de SHP ne leur permettait pas d'être utilisées à proximité de la canopée. Les lumières à vapeur de SHP ne fournissaient également qu'une seule gamme de spectres qui n'était pas réglable. Les lumières à DEL ont changé tout cela. La température de fonctionnement plus basse des lampes à DEL leur a permis d'être utilisées non seulement comme plafonniers, mais aussi comme éclairage d'appoint dans la canopée des cultures sur vigne comme la tomate, le concombre et les poivrons (Figure 26). En outre, en ajustant la gamme de spectres des DEL, il est devenu beaucoup plus facile de manipuler l'architecture de la canopée, ce qui a permis aux cultures qui n'étaient pas en mesure de bien pousser sous les lumières à vapeur de SHP de pousser sous les lumières à DEL.

Tableau 14. Consommation d'énergie typique des luminaires pour atteindre 220 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ de rayonnement photosynthétiquement actif (RPA)

Luminaire	Efficacité du luminaire ($\mu\text{mol}/\text{J}$)	Consommation d'électricité (W/m^2)	Consommation annuelle d'électricité (MJ/m^2) 2 000 heures	Consommation annuelle d'électricité (MJ/m^2) 2 500 heures
Nouvelle lampe à vapeur de SHP à double extrémité	1,7	129,4	931,8	1164,7
DEL blanche à large spectre	2,7	81,5	586,7	733,3
DEL à spectre rouge lointain	3,4	64,7	465,9	582,4
DEL rouge	4,0	55,0	396,0	495,0

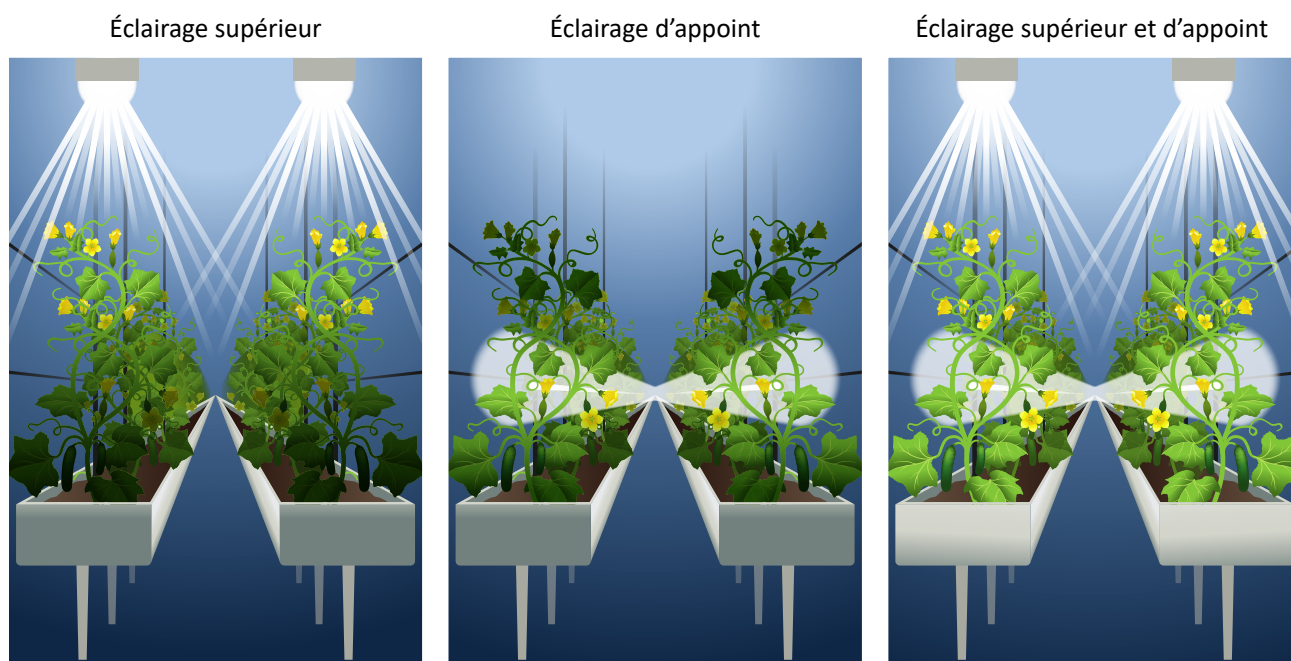


Figure 26. Distribution de la lumière supplémentaire.

La différence d'efficacité des luminaires est un autre facteur important pour votre exploitation. Les lampes à DEL sont généralement plus efficaces que les lampes à vapeur de SHP (Tableau 14).

L'efficacité d'un appareil lors de la production d'un rayonnement photosynthétiquement actif (RPA, 400-700 nm) est mesurée en nombre de photons (μmoles) par joule (J) d'électricité qu'il consomme. Plus le nombre d' $\mu\text{mol}/\text{J}$ pour un luminaire est élevé, plus il produit de lumière par joule et plus il est efficace. L'efficacité des lampes à vapeur de SHP varie de 0,9-1,8 $\mu\text{mol}/\text{J}$ selon le type, alors que l'efficacité des lumières à DEL varie généralement de 2,0 à 4,0 $\mu\text{mol}/\text{J}$. Cela signifie que dans la plupart des cas, les lampes à DEL consomment moins d'énergie que les lampes à vapeur de SHP.

La culture des fruits et des légumes de serre en hiver à l'aide d'un éclairage supplémentaire n'est pas aussi facile que d'appuyer sur un interrupteur. Les producteurs doivent également prévoir les éléments suivants :

- sélection des cultivars
- calendrier de culture
- densité végétale
- systèmes de formation
- contrôle de la température
- programme d'irrigation

Le changement le plus évident est le calendrier de récolte. La culture en serre non éclairée de tomates, de poivrons et de concombres sur fil élevé commence généralement par la plantation autour de décembre et de janvier, la récolte se termine autour d'octobre, puis le nettoyage se fait en novembre. La production de ces cultures en hiver ou pour une production toute l'année à l'aide d'un éclairage supplémentaire commence généralement par la plantation autour de septembre et d'octobre, puis la récolte se termine aux mois de juillet ou d'août suivants.

En plus de modifier le programme de culture, les programmes de climatisation et d'irrigation doivent être ajustés pour la production hivernale sous éclairage afin de s'adapter aux trois périodes de conditions d'éclairage différentes, soit :

- lumière naturelle uniquement ou lumière du jour plus lumière artificielle

- lumière artificielle uniquement
- nuit noire

L'irrigation doit commencer lorsque l'éclairage supplémentaire est allumé, généralement quelques heures avant le lever du soleil. Les lumières supplémentaires doivent être éteintes environ une heure avant le coucher du soleil pour permettre aux abeilles pollinisatrices de retourner dans leurs ruches, sinon elles pourraient être désorientées par la lumière artificielle.

La sélection des cultivars change également lors de la croissance avec un éclairage supplémentaire. De nombreux cultivars de légumes de serre adaptés à la production non éclairée peuvent ne pas convenir à la production hivernale sous éclairage supplémentaire. Le type d'éclairage supplémentaire influence également la sélection des cultivars. Par exemple, les lumières à vapeur de SHP peuvent provoquer une sénescence plus rapide chez les cultivars génératifs, tandis que les lumières à DEL peuvent retarder la production de fruits chez les cultivars vigoureux.

Les producteurs devraient réfléchir à quatre éléments principaux lorsqu'ils conçoivent une stratégie d'éclairage pour la culture en hauteur de légumes de serre :

1

Intensité lumineuse — Quelle intensité lumineuse doit être utilisée? Il s'agit de ce qu'on appelle généralement la densité de flux photonique photosynthétique (PPFD), soit la mesure de la quantité de lumière de RPA que les plants reçoivent en micromoles (μmol) par mètre carré (m^2) par seconde.

2

Photopériode — Quelle photopériode doit être utilisée? La photopériode est la durée pendant laquelle il y a de la lumière, qu'il s'agisse de la lumière du soleil ou de la lumière artificielle, et elle est généralement mesurée en heures. Lorsque vous multipliez l'intensité lumineuse ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{heure}$) par la photopériode (en heures), vous obtenez l'intégrale de lumière quotidienne (DLI). Il s'agit de la quantité totale de lumière accumulée que les plants reçoivent en une journée, mesurée en moles ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{jour}$).

3

Spectre lumineux — Quel spectre lumineux doit être utilisé? Il s'agit de la qualité de la lumière ou de la couleur de la lumière produite par les luminaires mesurée en nanomètres (nm). La lumière blanche à large spectre couvre généralement le spectre de RPA (400-700 nm), la lumière bleue est de 400-500 nm, la lumière verte, jaune ou ambre est de 500-600 nm, la lumière rouge est de 600-700 nm et le rayonnement rouge lointain est de 700-800 nm.

4

Distribution de la lumière — Quelle distribution verticale de la lumière doit être utilisée? Les lumières peuvent être utilisées comme éclairage supérieur au-dessus de la canopée, éclairage d'appoint à l'intérieur de la canopée ou une combinaison des deux. Comme mentionné précédemment, les lampes à vapeur de SHP et à DEL peuvent être utilisées de différentes manières.

Les valeurs générales standard d'intensité lumineuse, de photopériode et de DLI utilisées aujourd'hui pour la production hivernale de tomates, de concombres et de poivrons sur fil élevé sont indiquées dans le [Tableau 15](#). Veuillez noter que ces valeurs varient en fonction du cultivar, du climat local et du luminaire.

Depuis 2002, une grande partie de la recherche sur l'éclairage qui a contribué à faire progresser l'industrie des serres potagères de l'Ontario a été menée par des scientifiques du Centre de recherche et de développement de Harrow d'Agriculture et Agroalimentaire Canada en collaboration avec d'autres institutions de recherche. Cette section vise à mettre en évidence et à résumer la recherche sur l'éclairage des serres de légumes menée à Harrow depuis 2012. Chacune des sections

ci-dessous comprend des renseignements propres à une culture en serre différente (concombres, tomates et poivrons), des renseignements sur les recettes d'éclairage utilisées par les chercheurs et les résultats des essais. La dernière section comprend des renseignements sur la recherche sur l'éclairage dynamique qui a été menée sur plusieurs cultures (tomates, concombres, poivrons et micropousses). La recherche sur l'éclairage dynamique permettra aux producteurs de vraiment tirer parti de la flexibilité de la production offerte par la technologie de DEL et de la variation du prix du marché de l'électricité pour réduire les coûts énergétiques.

Mini concombres, luminaires à vapeur de SHP au plafond et éclairage d'appoint à DEL

Certains des premiers essais d'éclairage de cultures végétales à Harrow ont été publiés par Hao et coll. en 2012 et 2015. Ces essais ont été menés sur des mini-concombres. La première série d'essais a porté sur l'éclairage au plafond à vapeur de SHP combiné à des systèmes d'éclairage à DEL ([Figure 27](#)).



Figure 27. Éclairage d'appoint à DEL pour les mini concombres.
Source : Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Tableau 15. Installation d'un éclairage supplémentaire dans la production de légumes de serre en hiver

Culture	Intensité (µmol/m ² /sec)	Photopériode (heures)	DLI pratique (mol/m ² /jour) ¹	DLI pour le rendement le plus élevé (mol/m ² /jour) ²
Concombre	200-250	16-20	~20	> 30
Tomate	200-250	16-18	~20	> 30
Poivron	100-200	13-16	~16	> 20

¹ Il s'agit de la DLI totale (lumière du soleil + lumière supplémentaire) normalement utilisée dans les exploitations commerciales pour maintenir une bonne production. Des DLI plus élevées peuvent encore augmenter le rendement, mais pas nécessairement se traduire par des profits plus élevés, car le gain de rendement supplémentaire peut ne pas justifier les coûts d'intrants supplémentaires.

² Il s'agit de la DLI totale permettant d'obtenir le rendement le plus élevé.

Recettes d'éclairage (tableau 16)

La culture a été produite sous 145 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ d'éclairage au plafond à vapeur de SHP en combinaison avec 14,5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ d'éclairage d'appoint à DEL (10 % de la lumière du plafond). Des luminaires d'éclairage d'appoint rouge (660 nm), bleu (460 nm) et blanc (large spectre 400-700 nm) ont été testés pour déterminer la meilleure couleur. La photopériode variait entre 12 et 20 heures en fonction des conditions de lumière naturelle. Les périodes d'éclairage supplémentaires ont augmenté à mesure que la culture arrivait à maturité, passant de 12 heures par jour la semaine après la plantation à 20 heures par jour lorsqu'une canopée complète s'était développée. L'éclairage a été placé à 60 cm au-dessus de la rigole de croissance surélevée à proximité du fruit de la récolte.

La deuxième série d'essais s'est concentrée sur l'optimisation de la combinaison de l'éclairage à vapeur de SHP au plafond et de l'éclairage d'appoint rouge et bleu en testant différentes intensités aériennes (120 et 165 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$) et différentes intensités d'éclairage d'appoint (une ou deux rangées de DEL rouge et bleue produisant 36,7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ de lumière pour chaque luminaire). Ces essais ont également testé différentes densités de plantation (2,8 et 3,6 plantes/ m^2) pour déterminer si la densité des plants affectait la réponse à l'éclairage d'appoint. Les luminaires supérieurs à vapeur de SHP ont été placés à 3 m du sol et l'éclairage à DEL a été placé à mi-hauteur de la canopée des cultures. Lorsqu'il y avait deux modules d'éclairage d'appoint inclus, l'un était placé à environ 60 cm au-dessus du bord inférieur de la canopée et l'autre module était placé à 40 cm au-dessus du module inférieur. Ensemble, les deux modules ont fourni 73,4 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ de lumière rouge et bleu. La photopériode variait entre 9 et 20 heures et les périodes d'éclairage supplémentaires augmentaient avec l'âge des cultures de manière similaire à la première série d'expériences. L'éclairage supplémentaire se terminait toujours juste avant le coucher du soleil. Les photopériodes plus longues ont été obtenues en démarrant l'éclairage plus tôt dans la nuit, par exemple à 23 h pour la photopériode de 18 heures.

Résultats

Dans la première série d'expériences, les plants avec éclairage à DEL bleu étaient plus grands que les plants sans éclairage d'appoint en plus des luminaires à vapeur de SHP au plafond. Les plants exposés aux traitements d'éclairage d'appoint à

Tableau 16. Recettes des essais d'éclairage sur les mini concombres avec luminaires à vapeur de SHP au plafond et éclairage d'appoint à DEL

Facteurs	Essai de recette 1	Essai de recette 2
Luminaires	Lampes à vapeur de SHP au plafond Éclairage d'appoint à DEL	Lampes à vapeur de SHP au plafond Éclairage d'appoint à DEL
DEL colorées	Rouge (660 nm) Bleu (460 nm) Blanc (400-700)	Rouge et bleu
Intensité ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$)	SHP - 145 DEL - 14,5 (10 % de l'éclairage à vapeur de SHP)	SHP - 120 ou 165 DEL - 36,7 (un ou deux luminaires)
Photo période (h)	12 heures après la plantation, puis augmentation à 20 heures à pleine canopée	12 heures après la plantation, puis augmentation à 20 heures à pleine canopée

DEL rouge et blanc avaient plus de feuilles que les plants sans éclairage. L'éclairage à DEL rouge, bleu et blanc a permis d'améliorer la qualité visuelle des fruits et d'augmenter le rendement de plus de 10 % au début de la production. Cependant, les améliorations de rendement associées à l'éclairage d'appoint à DEL n'étaient pas aussi significatives pendant les périodes de production tardive.

Dans la deuxième série d'expériences, sans éclairage à vapeur de SHP au plafond, l'éclairage d'appoint à DEL a augmenté le poids commercialisable des fruits de 32 % par rapport au groupe de contrôle sans éclairage supplémentaire. La combinaison des plafonniers à vapeur de SHP et de l'éclairage d'appoint à DEL a une fois de plus augmenté le rendement et la qualité des fruits par rapport à l'éclairage seul des plafonniers à vapeur de SHP. En combinaison avec l'éclairage supérieur à vapeur de SHP moins intense, les doubles rangées d'éclairage d'appoint à DEL ont augmenté le poids des fruits commercialisables de 42 % par rapport à l'éclairage supérieur seul. L'utilisation d'une seule rangée d'éclairage d'appoint à DEL et de l'éclairage à vapeur de SHP plus intense au plafond ont augmenté le poids commercialisable des fruits de 10 % par rapport à l'éclairage au plafond seul et les mini-concombres étaient plus verts. Les meilleurs résultats avec un éclairage supérieur et un éclairage d'appoint de faible intensité ont été obtenus lorsqu'une densité végétale plus faible a été utilisée. En revanche, une densité végétale plus élevée a donné les meilleurs résultats avec un éclairage supérieur et un éclairage d'appoint plus intenses.

Tomates, luminaires à vapeur de SHP et lumière du rouge lointain

L'une des premières études sur la lumière du rouge lointain à Harrow a été publiée par Hao et coll. en 2016. L'étude portait sur l'effet de l'ajout d'une lumière du rouge lointain (725-750 nm) sur les plants de tomates cultivés sous des lumières à vapeur de SHP (Figure 28).



Figure 28. Plants de tomates sous lampes à vapeur de SHP.

Source : Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Recettes d'éclairage (Tableau 17)

Les plants de tomates cultivés sous des lampes à vapeur de SHP avec $165 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ ont reçu quatre traitements de lumières du rouge lointain (0, 8, 16 et $24 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$). La photopériode a débuté à 1 h du matin et a duré jusqu'à 17 h en décembre, à 17 h 20 en janvier, à 18 h 02 en février et à 19 h 10 en mars. Toutes les lumières étaient éteintes lorsque le rayonnement solaire extérieur était supérieur à 300 W par m^2 .

Résultats

Le rayonnement rouge lointain supplémentaire a fourni des avantages au début de la période de croissance pendant l'hiver, lorsque le rayonnement

Tableau 17. Recettes des essais d'éclairage sur les tomates avec luminaires à vapeur de SHP au plafond et éclairage d'appoint à DEL

Facteurs	Recettes à essayer
Luminaires	Plafonniers à vapeur de SHP Plafonniers à DEL
DEL colorées	Rouge lointain (725-750 nm)
Intensité ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$)	SHP - 165 DEL - 0, 8, 16 et 24
Photopériode (h)	Déc. - 16 h (1 h à 17 h) Janv. - 16 heures et $\frac{1}{3}$ (1 h à 17 h 20) Févr. - ~17 heures (1 h à 18 h 02) Mars - ~18 heures (1 h à 19 h 10) Pas de lumière lorsque la lumière du soleil > $300 \text{ W}/\text{m}^2$

rouge lointain naturel était faible. La longueur de l'entre-nœud et la teneur en chlorophylle des jeunes feuilles augmentaient avec l'intensité plus élevée du rayonnement rouge lointain supplémentaire. Le rendement et la taille des plants de tomates ont également augmenté de manière significative, jusqu'à 6 % pour les fruits commercialisables, avec des traitements au rayonnement rouge lointain au cours du premier mois de l'essai (de janvier à février). Le rayonnement rouge lointain a également modifié la qualité du fruit en augmentant la teneur totale en caroténoïdes du fruit. Les avantages du rayonnement rouge lointain, cependant, n'ont pas persisté dans les dernières périodes de croissance en mars, alors qu'il y avait plus de rayonnement rouge lointain naturel.

Dans l'ensemble, la faible dose de rayonnement rouge lointain ($8 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) a permis d'obtenir un rendement en fruits similaire à celui des doses plus élevées, a consommé moins d'électricité et a entraîné des coûts d'investissement et d'installation plus faibles. Cette intensité est inférieure à l'intensité du rayonnement rouge lointain mentionné dans la section ci-dessous sur les poivrons, car ces lampes à vapeur de SHP avaient environ 10 % de rayonnement rouge lointain ou environ $17 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ en plus du rayonnement rouge lointain des DEL.

Poivrons, éclairage à vapeur de SHP et à DEL et rayonnement rouge lointain

Hao et coll. (2019) ont présenté des données provenant d'expériences sur l'effet du rayonnement rouge lointain sur les plants de poivron menées entre novembre 2017 et juin 2018 (Figure 29).



Figure 29. Plants de poivrons à entre-nœuds courts.
Source : Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Recettes d'éclairage (Tableau 18)

Les plants ont été cultivés à moins de 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ d'éclairage au moyen de :

1. lumières à vapeur de SHP
2. lumières à vapeur de SHP et DEL
3. DEL blanches
4. DEL rouges et bleues

Une photopériode de 18 heures a été utilisée, et les lumières étaient éteintes lorsque le rayonnement solaire extérieur était supérieur à 300 W/m^2 . Chacun de ces traitements de lumière du plafond comprenait également de 0,26 ou 52 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ de rayonnement rouge lointain. Sans rayonnement rouge lointain supplémentaire, les lumières à vapeur de SHP produisaient déjà un rayonnement rouge lointain alors que les lumières à DEL ne le faisaient pas.

Tableau 18. Recettes des essais d'éclairage sur les poivrons avec luminaires à vapeur de SHP, éclairage à DEL et rayonnement rouge lointain

Facteurs	Recettes à essayer
Luminaires	Lumières à vapeur de SHP Éclairage combiné de lumières à vapeur de SHP et à DEL au plafond
DEL colorées	Blanc (400-700 nm) Rouge/bleu Rouge lointain (725-750)
Intensité ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$)	SHP - 200 DEL - 0, 26, 52
Photopériode (h)	18 Aucune lumière lorsque la lumière du soleil > 300 W/m^2

Résultats

Les poivrons cultivés sous des lumières à DEL blanches étaient les plus hauts (12-15 % de plus) et présentaient le moins de chlorose foliaire (73-90 % de moins). Ceux cultivés sous des lampes à DEL rouges et bleues étaient les plus courts avec une chlorose foliaire modérée, tandis que les plants cultivés sous des lampes à vapeur de SHP avaient la plus grande chlorose foliaire et une hauteur modérée, par rapport aux autres traitements. L'ajout de rayonnement rouge lointain a augmenté la hauteur des plants cultivés sous toutes les lumières de 3 à 7 %, à l'exception des plants déjà hauts cultivés sous des lumières à DEL blanches. Le rayonnement rouge lointain a également augmenté le rendement de 4 à 14 % sous tous les types d'éclairage, à l'exception des lumières à DEL rouges et bleues à faible rayonnement rouge lointain. Contrairement aux tomates, ces augmentations de rendement ont été observées tout au long de la production hivernale.

Longue photopériode d'éclairage dynamique de faible intensité des tomates, des mini concombres, des poivrons et des micropousses

Les augmentations de rendement de l'éclairage supplémentaire sont principalement déterminées par la DLI ajoutée, comme le résume l'expression simplifiée « 1 % d'augmentation de la lumière = 1 % d'augmentation du rendement ». La DLI requise peut être atteinte sur une période de temps plus courte avec un éclairage d'intensité

plus élevée ou sur une période de temps plus longue avec un éclairage d'intensité plus faible. L'utilisation d'une photopériode plus longue avec un éclairage de faible intensité peut réduire considérablement les coûts des luminaires par rapport à une photopériode plus courte et à une intensité lumineuse plus élevée, car moins de lumières devraient être installées. De plus, dans des régions comme l'Ontario où les prix de l'électricité fluctuent considérablement à différents moments de la journée, des photopériodes plus longues permettent beaucoup plus de flexibilité pour utiliser de l'électricité moins chère afin d'atteindre la DLI cible, réduisant ainsi considérablement les coûts de l'électricité. Cependant, les plants ont une horloge biologique et ont besoin de « sommeil », tout comme les humains. Si la photopériode est plus longue que certains seuils, tels que 16-17 heures pour les tomates, cela entraînera des blessures aux feuilles et une réduction du rendement. C'est ce qu'on appelle une lésion photopériodique (Figure 30). Nous devons d'abord trouver des moyens de surmonter l'horloge biologique de la culture afin d'allonger la photopériode sans engendrer de lésion pour permettre une croissance et un développement normaux ou meilleurs des plants.



Figure 30. Feuilles de tomate avec lésions photopériodiques.
Source : Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Au cours des dernières années, la recherche à Harrow a principalement été axée sur les essais de diverses recettes d'éclairage avec des photopériodes plus longues (jusqu'à 24 heures) et des intensités de lumière réduites pour trouver des moyens d'éviter les lésions photopériodiques. Cela a été fait à l'aide de lumières dynamiques capables de produire différents spectres lumineux à différentes intensités à différents moments de la journée.

Recettes et résultats de l'utilisation de la lumière dynamique pendant 24 heures sur les cultures de tomates

Le premier essai d'éclairage réussi de 24 heures mené par des scientifiques à Harrow a été publié par Lanoue et coll. en 2019. L'étude portait sur la production de tomates en serre sous 24 heures d'éclairage supplémentaire en utilisant :

- lumière rouge alternée ($200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ de 6 h à 18 h);
- lumière bleue ($50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ de 18 h à 6 h).

Ce modèle d'éclairage a été comparé à une photopériode d'éclairage de 12 heures avec des lumières rouges et bleues :

- lumière rouge à $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ plus lumière bleue à $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ de 6 h à 18 h.

L'éclairage a été appliqué de novembre à mai. L'éclairage supplémentaire est resté allumé indépendamment des niveaux de rayons solaires pour s'assurer que les deux traitements ont reçu la même DLI totale (Figure 31).

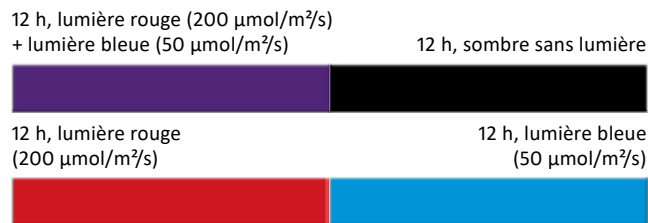


Figure 31. Recettes des essais d'utilisation de la lumière dynamique pendant 24 heures sur les cultures de tomates.

Les plants cultivés sous un éclairage de 24 heures ont poussé de la même manière que ceux exposés à moins de 12 heures de lumière, mais ils ont produit 12 % de surface foliaire en plus et 10 % de poids frais de tige en plus. Les plants des deux recettes d'éclairage produisaient également un nombre similaire de fruits, mais les fruits produits par les plants cultivés sous une lumière de 24 heures pesaient 15 % de plus que les fruits produits par les plants sous la recette légère de 12 heures. Cependant, ces différences n'ont été observées que dans les premières semaines de l'expérience. Les plants cultivés sous les deux recettes d'éclairage étaient similaires plus tard dans la saison de croissance.

Recettes et résultats de l'utilisation de la lumière dynamique pendant 24 heures sur les cultures de mini concombres

Une autre étude publiée en 2021 par Lanoue et coll. portait sur la production de mini concombres sous éclairage interrompu. Il y avait quatre programmes :

- 1 16 heures (6 h à 22 h) de lumière rouge (149 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) plus lumière bleue (25 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)
- 2 24 heures de lumière rouge (96 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) plus lumière bleue (17 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)
- 3 24 heures de lumière rouge alternée (151 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ pendant 16 heures, de 6 h à 22 h) suivie d'une lumière bleue (40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ pendant 8 heures, de 22 h à 6 h)
- 4 24 heures de lumière rouge alternée (210 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ pendant 12 heures, de 6 h à 18 h) suivie d'une lumière bleue (31 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ pendant 12 heures, de 18 h à 6 h)

Tous les programmes menaient à la même DLI de 10 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{jour}$. L'éclairage a commencé en novembre et les lumières sont restées allumées indépendamment du rayonnement solaire pour s'assurer que tous les programmes d'éclairage avaient la même DLI (Figure 32).

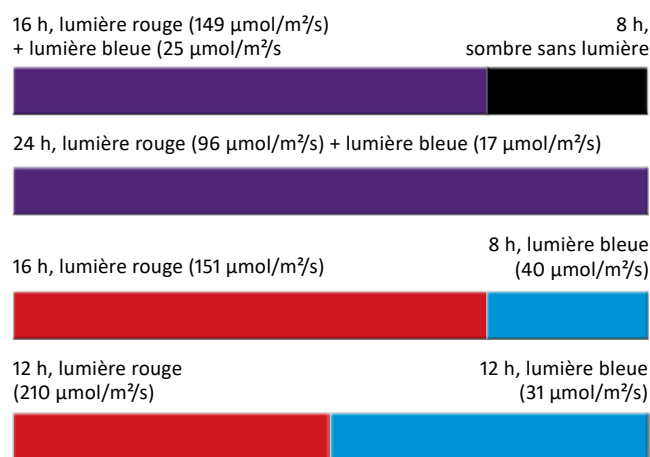


Figure 32. Recettes des essais d'utilisation de la lumière dynamique pendant 24 heures sur les cultures de mini concombres.

Tous les plants cultivés sous un éclairage de 24 heures avaient une teneur en chlorophylle plus élevée dans leurs feuilles par rapport au traitement par photopériode de 16 heures, mais aucune autre différence de croissance ou de rendement n'a été observée entre les programmes. Cependant, les programmes d'éclairage de 24 heures ont eu un avantage économique sur la période d'éclairage plus courte en réalisant la même DLI avec moins de luminaires et en déplaçant une partie de la demande d'électricité vers les heures de nuit lorsque les prix sont généralement bas en Ontario.

Recettes et résultats de l'utilisation de la lumière dynamique pendant 24 heures sur les cultures de poivrons

Un article publié par Lanoue et coll., 2022a, sur l'étude de l'utilisation du rayonnement rouge lointain dans un programme d'éclairage 24 heures sur 24 pour les plants de poivron. Cinq programmes ont été étudiés :

- 1 16 heures de lumière blanche (large spectre, 400-700 nm)
- 2 24 heures de lumière blanche
- 3 24 heures en alternance entre la lumière blanche (pendant 16 heures) suivie de la lumière bleue (400-500 nm pendant 8 heures)
- 4 24 heures en alternance entre la lumière blanche (pendant 16 heures) suivie de la lumière bleue et du rayonnement rouge lointain (700-800 nm pendant 8 heures)
- 5 24 heures en alternance entre une lumière blanche (pendant 16 heures) suivie du rayonnement rouge lointain (pendant 8 heures)

Deux expériences ont été menées avec les programmes ci-dessus. La première expérience donnait une DLI de RPA de 13 mol/m²/jour et un DLI rouge lointain de 1,3-1,5 mol/m²/jour et la

deuxième expérience avait un DLI de RPA de 10-11 mol/m²/jour et un DLI rouge lointain de 1,0-1,1 mol/m²/jour (Tableau 19), (Figure 33).

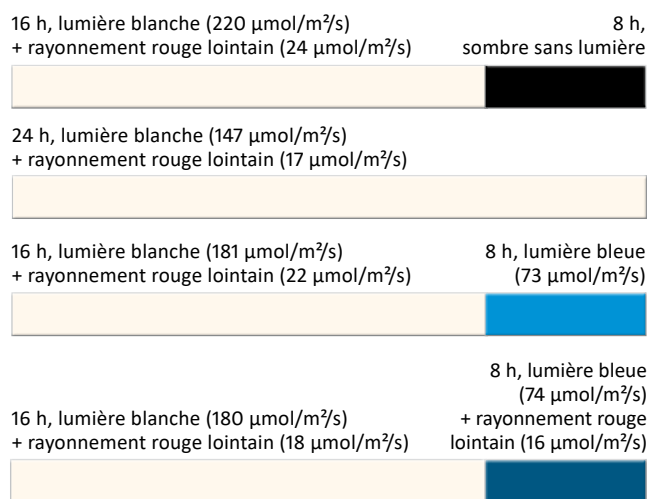
Tableau 19. Couleur, intensité et DLI de la lumière diurne/nocturne pour les programmes d'éclairage de 16 et de 24 heures sur les poivrons¹

Légende : S.O. = Sans objet

Éclairage Type	Intensité/DLI	Programme 1	Programme 2	Programme 3	Programme 4	Programme 5
Expérience 1						
RPA	Intensité diurne	220 (blanc)	147 (blanc)	181 (blanc)	180 (blanc)	S.O.
RPA	Intensité nocturne	0	147 (blanc)	75 (bleu)	74 (bleu)	S.O.
RPA	DLI	13	13	13	13	S.O.
Rouge lointain	Intensité diurne	24	17	22	18	S.O.
Rouge lointain	Intensité nocturne	0	17	0	16	S.O.
Rouge lointain	DLI	1,4	1,5	1,3	1,5	S.O.
Expérience 2						
RPA	Intensité diurne	180 (blanc)	121 (blanc)	153 (blanc)	153 (blanc)	183 (blanc)
RPA	Intensité nocturne	0	121 (blanc)	55 (bleu)	56 (bleu)	0
RPA	DLI	10	10	10	10	11
Rouge lointain	Intensité diurne	19	13	18	13	13
Rouge lointain	Intensité nocturne	0	13	0	11	10
Rouge lointain	DLI	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0

¹ Toutes les valeurs d'intensité lumineuse ont été mesurées en µmol/m²/s et les chiffres de la DLI étaient en mol par m² par jour.

A. Expérience 1



B. Expérience 2

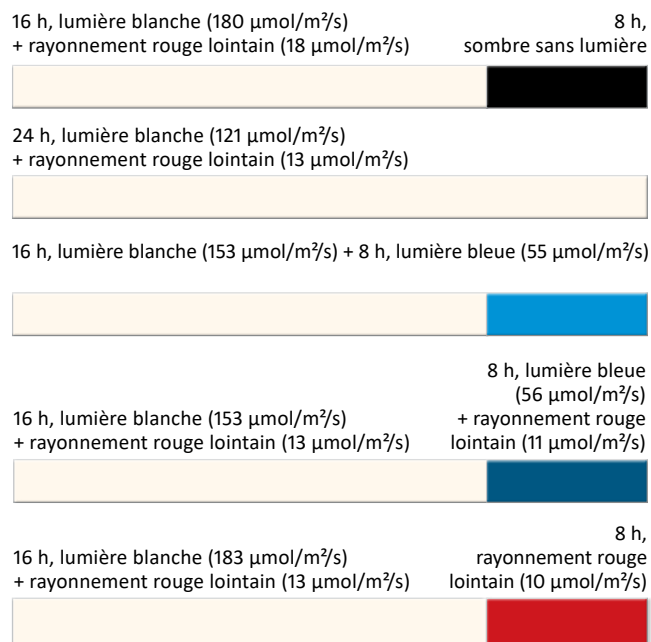


Figure 33. Éclairage dynamique et rayonnement rouge lointain sur les cultures de poivrons. Recettes des essais de l'expérience 1 (A) et de l'expérience 2 (B).

Le rendement et la taille des fruits étaient similaires dans tous les programmes, sauf pour les plants qui recevaient moins de 24 heures de lumière blanche. Ces plants avaient un nombre de fruits et un poids de fruits inférieurs à ceux de tous les autres programmes. Les deux traitements d'éclairage qui comprenaient un rayonnement rouge lointain ont permis d'améliorer l'architecture de la canopée avec des plants de 54 à 63 % plus grands et d'augmenter la longueur des entre-nœuds, ce qui a empêché l'empilement des fruits (Figure 34). Ces différences ont été observées constamment au début et à la fin des périodes de production.



Figure 34. Empilage des fruits dans les poivriers à entre-nœuds courts.

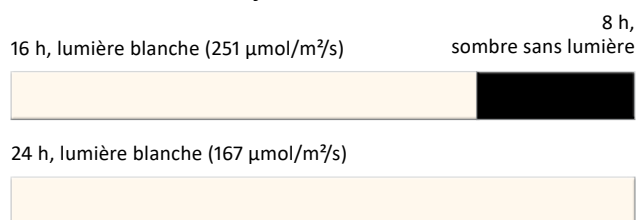
Source : Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Recettes et résultats de l'utilisation de la lumière dynamique pendant 24 heures sur les cultures de micropousses

Dans une autre publication récente de Lanoue et coll., 2022 b., on a étudié l'effet de la lumière blanche sur 24 heures sur la croissance de quatre types de micropousses : amarante, chou vert, basilic vert et basilic violet. Ces

expériences ont été menées dans des chambres de croissance, elles s'appliquent donc davantage aux exploitants de cultures verticales qu'aux producteurs en serre. Certains plants ont été exposés à une DLI de 14-15 mol/m²/jour sous 16 heures de lumière (251 μmol/m²/s) ou 24 heures de lumière (167 μmol/m²/s), tandis que d'autres plants ont été exposés à une DLI plus élevée de 21-22 mol/m²/jour sous 16 heures de lumière (377 μmol/m²/s) ou 24 heures de lumière (248 μmol/m²/s) Figure 35).

DLI = 14-15 moles/m²/jour



DLI = 21-22 moles/m²/jour

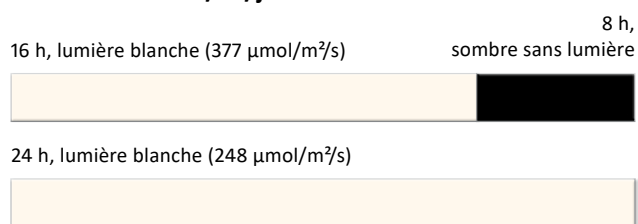


Figure 35. Recettes des essais d'utilisation de la lumière dynamique pendant 24 heures sur les cultures de micropousses.

Des augmentations de rendement (poids frais) ont été observées pour toutes les micropousses, notamment une augmentation de 93 % de l'amarante, une augmentation de 46 % du basilic violet, une augmentation de 43 % du basilic vert et une augmentation de 21 % des choux verts lorsque la photopériode a été prolongée de 16 heures à 24 heures en utilisant la même intensité lumineuse. La qualité des aliments, mesurée par la teneur en antioxydants, en phénoliques, en anthocyanes et en chlorophylle, n'a généralement pas été modifiée ou augmentée sous 24 heures d'éclairage. En outre, le coût de l'électricité par unité de biomasse fraîche a été réduit de 8 à 38 % dans toutes les micropousses lorsqu'ils ont été cultivés sous éclairage 24 heures sur 24, car certaines demandes d'électricité ont été déplacées des heures de pointe plus chères vers les heures creuses moins chères.

Références

- Hao et coll. 2012. « [LED Inter-Lighting in Year-Round Greenhouse Mini-Cucumber Production](#) ». ISHS Acta Horticulturae. 956 : 335-340.
- Hao et coll. 2015. « [Inter-Lighting in Mini-Cucumber: Interactions with Overhead Lighting and Plant Density](#) ». ISHS Acta Horticulturae. 1107:291-296.
- Hao et coll. 2016. « [Far-Red LEDs Improve Fruit Production in Greenhouse Tomato Grown Under High-Pressure Sodium Lighting](#) ». ISHS Acta Horticulturae. 1134:95-102.
- Hao et coll. 2019. *Effects of Far-Red LED Light on Plant Growth, Fruit Yield and Quality of Greenhouse Sweet Peppers Grown Under Top High Pressure Sodium, LED and Hybrid Lighting*. Présentation à Greensys 2019.
- Lanoué et coll. 2019. « [Alternating Red and Blue Light-Emitting Diodes Allows for Injury-Free Tomato Production with Continuous Lighting](#) ». Frontiers in Plant Science. 10:1114.
- Lanoué et coll. 2021. « [Continuous Light Does Not Compromise Growth and Yield in Mini-Cucumber Greenhouse Production With Supplemental LED Light](#) ». Plants. 10:378.
- Lanoué et coll. 2022a. « [The Power of Far-Red Light at Night : Photomorphogenic, Physiological, and Yield Response in Pepper During Dynamic 24 Hour Lighting](#) ». Frontiers in Plant Science. 13 : 857616.
- Lanoué et coll. 2022b. « [Continuous Lighting Can Improve Yield and Reduce Energy Costs While Increasing or Maintaining Nutritional Contents of Microgreens](#) ». Frontiers in Plant Science. 13 : 983222.



CHAPITRE 10

Énergie dans les serres

L'énergie est l'une des plus grandes dépenses de la production de légumes de serre. L'utilisation judicieuse de la technologie de conservation de l'énergie est recommandée pour les serres commerciales. Cependant, l'incidence de cette technologie sur la production végétale doit être prise en compte. Il n'est pas conseillé de maintenir simplement une température plus basse sur 24 heures, car cela diminue le développement des plants, entraîne une baisse de la qualité des fruits et augmente l'incidence des maladies. Au lieu de cela, il est préférable d'optimiser les conditions de culture pour un rendement économique maximal.

Le matériau de revêtement de la serre a une incidence considérable sur la consommation d'énergie. Les serres à double couches en polyéthylène économes en énergie ou les parois latérales en acrylique à double paroi sont courantes en Ontario. Les pratiques de gestion et de culture ont changé pour compenser la transmission lumineuse plus faible et le taux d'échange d'air par heure plus faible de ces serres sans réduire la production agricole. L'échange d'air naturel dans une serre est de 0,75 à 1,5 échange par heure, tandis que les

serres à double couches en polyéthylène ont 0,2 à 1,0 échange par heure. Gardez à l'esprit que les nouvelles serres (à la fois à double couches de polyéthylène et en verre) ont beaucoup moins de pertes par infiltration que les anciennes serres : 0,5 à 1 échange d'air par heure contre 1 à 4 échanges d'air par heure. Dans toutes les serres, l'échange naturel (et donc la perte de chaleur) augmente avec l'âge : le film en polyéthylène et l'étanchéité autour du verre doivent être maintenus en bon état.

Les nouveaux développements dans les films en polyéthylène pour les serres ont amélioré les économies d'énergie. Les films infrarouges (IR) et les films anti-condensation en sont des exemples. Les films IR diminuent la perte de chaleur de la serre, tandis que les films anti-condensation réduisent le besoin de ventilation pour gérer l'environnement de la serre. De plus, il y a peu d'accumulation d'eau sur la surface intérieure du toit avec des films anti-condensation, de sorte que la transmission de la lumière est augmentée.

Les autres techniques d'économie d'énergie à mettre en œuvre comprennent les suivantes :

- installation et utilisation de rideaux thermiques ou de réduction de la lumière

- isolation des tuyaux de chauffage pour réduire les pertes de chaleur le long de la ligne principale et des collecteurs pendant le transit depuis la chaufferie
- isolation des parois latérales et des fondations — isoler au moins 0,6 m sous le niveau du sol
- installation de brise-vents — abriter la serre des vents dominants diminuera les pertes d'infiltration
- réglages du système de chauffage qui comprennent l'entretien régulier de la chaudière
- placement de la chaleur — placer les caloducs à proximité des plants pour réduire les pertes sur les surfaces de la serre et placer les tuyaux de culture (tuyaux de chauffage à eau chaude de petit diamètre) dans la canopée des cultures pour améliorer la productivité et la qualité des plants
- retard de la plantation (dans les cas extrêmes) — planter lorsque les besoins en chauffage ne sont pas aussi élevés, mais garder à l'esprit que les cultures hâtives ont tendance à susciter des prix plus élevés sur le marché

Des écrans ou des rideaux thermiques ou d'ombrage sont utilisés dans toutes les serres en verre. Dans certains cas, deux ensembles de rideaux sont installés avec un écran ayant un facteur d'économie d'énergie élevé et le second avec des caractéristiques d'ombrage pour aider à la gestion du climat estival. Il y a une augmentation du nombre de serres à doubles couches en polyéthylène munies de rideaux thermiques.

Dans les situations où des lumières artificielles sont installées, il est préférable (voire obligatoire dans certaines municipalités) d'utiliser des rideaux occultants pour empêcher les émissions lumineuses hors site. Ces rideaux occultants peuvent également réduire les pertes d'énergie, mais doivent être intégrés dans la stratégie de croissance pour assurer un contrôle suffisant de l'humidité et de la température. Pour plus de renseignements, consultez la page [Managing Nighttime Greenhouse Light Emissions](#) sur [ONGreenhouseVegetables.ca](#) ou la page [L'incidence des rideaux occultants](#) sur [Ontario.ca](#).

Lors du démarrage des cultures pendant l'hiver (de décembre à février), une feuille de polyéthylène transparente temporaire de

2 mm peut être placée sur les fils de culture pour sceller la serre afin de réduire les pertes d'énergie et d'améliorer l'humidité dans la serre. L'écran est retiré une fois que le taux de respiration des plants libère l'excès d'humidité dans la serre.

Chauffage des serres

Pour une serre, les besoins de chauffage horaires et annuels peuvent être calculés en fonction des températures intérieures et extérieures, du type de vitrage et de la surface de la serre. Les fabricants de systèmes de chauffage destinés aux serres conçoivent des systèmes adaptés aux conditions locales. La recommandation habituelle en matière de système de chauffage pour un écart de température de 35°C est de 350 watts d'énergie thermique par mètre carré (W/m²) pour une serre en verre et de 270 W/m² pour une serre en polyéthylène double.

Les besoins en chaleur des principales cultures légumières de serre (c.-à-d., tomates, concombres, poivrons et laitue) varient considérablement. Même si certaines cultures (p. ex., la laitue) demandent moins de chaleur que d'autres, les besoins en chaleur de cultures qui en réclament davantage devraient habituellement être pris en compte dans la conception du système de chauffage afin que les producteurs puissent éventuellement passer facilement à d'autres cultures, s'ils le désirent.

Les systèmes de chauffage central sont les systèmes de chauffage les plus couramment utilisés dans les serres de l'Ontario. Le gaz naturel est la source d'énergie la plus fréquente, certains producteurs utilisant des copeaux de bois (déchets de bois) ou du combustible en granulés composés de bois, de cultures spéciales ou de résidus agricoles. Le mazout de soute et le mazout n°2 peuvent être utilisés comme réserve. Dans les régions où l'approvisionnement en gaz naturel n'est pas disponible, les producteurs utilisent du propane. Les progrès plus récents de la technologie des chaudières ont donné aux producteurs la possibilité d'installer des chaudières électriques ou des chaudières hybrides électricité et gaz naturel. Ces chaudières permettent aux producteurs d'utiliser l'électricité pour chauffer leur serre à un prix égal ou moins cher que le prix du gaz naturel à certains moments de

la journée en Ontario, tout en réduisant leurs émissions de gaz à effet de serre.

Avec les systèmes de chauffage central, la chaleur est fournie sous forme de vapeur ou d'eau chaude produite par une chaudière située au centre et distribuée par un système de tuyaux de chauffage. Le principal avantage de ce système est que les tuyaux peuvent être situés dans le périmètre, où les plus grandes pertes de chaleur se produisent ou à l'intérieur de la culture où ils sont les plus efficaces pour chauffer la culture. Les nouvelles serres optent pour le système de chauffage à eau chaude, car elles peuvent utiliser leurs chaudières pendant la journée pour produire du CO₂ pour l'enrichissement et l'eau chaude peut être stockée dans des réservoirs isolés pour une utilisation ultérieure la nuit (Figure 36).



Figure 36. Réservoirs de stockage d'eau chaude.

Le principal avantage des systèmes à eau chaude est la possibilité qu'ils offrent de régler la température de l'eau dans les tuyaux, lesquels sont placés à l'intérieur de la culture pour aider à garder une bonne circulation d'air entre les plants. Ils peuvent également être utilisés

comme réseau de rails utile à la circulation des voiturettes électriques ou à batterie, ce qui contribue à faciliter le travail du personnel. Des tuyaux de faible diamètre situés à 50 cm au-dessus de la culture, à l'intérieur de la frondaison, améliorent l'efficacité énergétique et réduisent l'incidence de la maladie (Figure 37).



Figure 37. Passage de tuyaux au niveau des fruits à maturité.

Les unités de chauffage au gaz sont la solution de rechange habituelle au système de chauffage central. Bien qu'économiques à installer, ces systèmes présentent plusieurs inconvénients majeurs :

- mauvaise répartition de la température
- plus grandes fluctuations de température
- efficacité de combustion saisonnière inférieure
- possibilité que les gaz du conduit de fumée pénètrent dans la serre

Certains producteurs ont fixé des conduits aux unités pour diriger l'air chaud entre les rangées de plants au moyen de grands tubes en polyéthylène. Cela améliore considérablement la distribution de la chaleur.

Refroidissement des serres

Les serres ont besoin de beaucoup de chaleur pour maintenir les températures pendant l'hiver. Dans les mois les plus chauds, cependant, il est nécessaire de réduire les températures. Les producteurs appliquent souvent un revêtement sur l'extérieur de leurs serres, également connu

sous le nom de badigeon, au printemps et en été, qui limite la quantité de rayonnement infrarouge entrant dans la serre. Cela réduit non seulement la chaleur entrant dans la serre, mais provoque également une certaine réduction de l'intensité de la lumière du soleil (ce qui peut être préjudiciable en été).

Le refroidissement se fait habituellement par un échange de l'air entre la serre et l'extérieur. Un renouvellement de l'air par minute est requis pendant les grandes chaleurs et les journées d'ensoleillement direct de l'été. La méthode de refroidissement la plus courante est la ventilation naturelle : ouverture d'évents de pointe pour les serres en verre et en acrylique et les conceptions plus récentes de serres à double couches de polyéthylène; ouverture d'évents de gouttière pour les modèles à double couches de polyéthylène plus anciens.

Dans ces systèmes passifs, l'échange d'air dépend des vents ambiants à l'extérieur de la serre. Si des ventilateurs de circulation sont utilisés pour assurer des conditions uniformes dans la serre, ils peuvent également aider à mélanger l'air entrant. Certains producteurs utilisent des moustiquaires à travers les ouvertures des événements : elles réduisent l'entrée des insectes et d'autres parasites dans la serre, au prix d'une certaine réduction du flux d'air à travers les événements. La ventilation à air forcé consiste à ajouter des ventilateurs pour échanger activement l'air extérieur et l'air de la serre pour s'assurer que l'échange d'air se produise même dans des conditions de vent faible. La ventilation à air forcé permet aussi l'installation d'un système de refroidissement supplémentaire pour l'été à l'aide de ventilateurs et d'un tapis humide, qui permet le refroidissement par évaporation. Certains producteurs utilisent les systèmes de brumisation à haute pression pour le refroidissement au printemps et en été et pour la maîtrise de l'humidité en hiver et au printemps. En Ontario, les serres de fruits et de légumes n'utilisent généralement pas de climatiseurs frigorifiques ni d'installations de refroidissement central.

Capteurs et commandes de température

Les producteurs utilisent généralement une gamme de capteurs électroniques mesurant la température, l'humidité, le dioxyde de carbone,

les niveaux de lumière et d'autres paramètres de fonctionnement pour suivre et maintenir des conditions de croissance optimales. Ces capteurs sont souvent utilisés en conjonction avec des contrôleurs industriels numériques ou des ordinateurs de contrôle centralisés.

À mesure que la technologie s'améliore, davantage de capteurs peuvent être utilisés dans les serres, augmentant ainsi les points de données pour prendre des décisions plus précises. Les capteurs de surveillance des cultures doivent être placés près des points de croissance, puis relevés au fur et à mesure de la croissance des plants, afin de surveiller la température du milieu entourant directement les points de croissance. Les capteurs de température infrarouges pour mesurer les températures des feuilles fournissent des renseignements plus précis sur les conditions du plant qui permettent un réglage plus fin de l'environnement de la serre pour améliorer l'efficacité. Si possible, déployez des capteurs à plusieurs endroits, car les températures varient souvent dans différentes parties de la serre. La lumière directe du soleil ou les conditions stagnantes peuvent amener les capteurs à donner des lectures qui ne sont pas représentatives de l'environnement de la serre. Utilisez un capteur en boîte à aspiration pour apporter l'air de serre à travers le capteur et fournir des lectures plus précises de la température et de l'humidité.

Les ordinateurs de contrôle climatique sont couramment utilisés dans les exploitations modernes de serriculture pour contrôler l'environnement intérieur et programmés pour ajuster ou maintenir les températures en fonction de plusieurs facteurs, notamment :

- l'heure de la journée;
- l'intensité de la lumière du soleil;
- l'humidité relative (HR).

En plus d'un point de consigne de température statique, l'ordinateur permet d'augmenter la température de la nuit au jour (et vice versa). Cette augmentation ou diminution contrôlée de la température permet aux producteurs de créer un profil de température optimal pour la croissance des plants, adapté à un cultivar ou à un style de culture sélectionné et aux conditions extérieures dominantes. Les logiciels

de contrôle du climat permettent de maîtriser de nombreux composants de la serre (chaudières, événements, rideaux d'ombrage, éclairage, etc.) pour maintenir les conditions intérieures. Cela offre aux producteurs la possibilité de faire des ajustements personnalisés qui sont adaptés pour maximiser la productivité et maintenir l'efficacité énergétique. Ces ordinateurs et les réseaux de capteurs associés nécessitent un investissement initial important. Cependant, comme ils procurent une maîtrise accrue des températures, de l'HR et du climat dans la serre, ils contribuent à réduire au minimum l'incidence des maladies, ce qui les rend indispensables quelle que soit la grosseur de la serre.



CHAPITRE 11

Culture des plants

Un bon départ est indispensable à l'obtention d'une culture uniforme qui donne un rendement élevé et un produit de bonne qualité. Un mauvais démarrage se traduit invariablement par un produit fini décevant, des coûts de main-d'œuvre accrus pour obtenir une bonne récolte, et des profits plus minces. Voici les trois points critiques à surveiller dans la production de plants (y compris par greffage) :

1 semis

2 semis et germination

3 culture des plants repiqués jusqu'au produit fini

La plupart des serriculteurs envoient leurs semences à des propagateurs spécialisés dans la germination, la greffe et le démarrage des greffes avant que les plantules ne soient renvoyées dans les serres de production pour la saison. Ce chapitre fournit des renseignements aux producteurs qui choisissent de multiplier leurs propres semis.

Semence

Utiliser de la semence de la plus haute qualité, afin de garantir un bon point de départ. La plupart des semences offertes aux producteurs de légumes de serre ont été nettoyées, ont subi un traitement et été soumises à des tests de germination ou de viabilité. Ces renseignements sont généralement imprimés sur l'emballage ou sont disponibles auprès du fournisseur de semences. Des laboratoires de certification de la semence effectuent les tests de germination suivant des protocoles stricts et normalisés. La germination s'entend de la sortie de la radicule hors du tégument séminal. Le plus souvent, le taux de germination se situe dans la fourchette de 75 à 90 % pour les tomates, à 95 % pour les concombres, dans la fourchette de 85 à 95 % pour les poivrons et à 95 % pour la laitue. Il faut donc rajuster en conséquence la quantité de semence commandée.

Pour le serriculteur ou le producteur de plantules, une valeur plus critique est le pourcentage d'émergence, défini comme le rapport entre le nombre de semis qui émergent du milieu de culture et le nombre de graines semées. La levée est influencée par bien des facteurs, dont :

- la vigueur de la semence;

- la profondeur de semis;
- le taux d'humidité du substrat;
- l'aération du substrat;
- la température du substrat.

La différence entre le pourcentage de germination et le pourcentage d'émergence peut varier jusqu'à 10 %-20 %.

Notez que le taux de germination des graines varie considérablement; certaines graines germent très rapidement, tandis que d'autres sont plus lentes. Les graines peuvent être regroupées en trois catégories en fonction de la germination. Le pourcentage dans chaque catégorie varie en fonction de l'espèce, du cultivar et de la qualité des graines et fluctue chaque année.

Catégorie I

Graines levant 23 jours après le semis

Catégorie II

Graines levant 34 jours plus tard que les graines de catégorie I

Catégorie III

Graines levant 34 jours plus tard que les graines de catégorie II; graines aux cotylédons tordus, aux pousses enfouies, etc.

Les plants issus des graines appartenant aux catégories I et II sont en fait ceux qui lèvent et les seuls qu'on devrait transplanter. Semez 25 % de graines en plus que le nombre de plants requis (Tableau 20). Cela fournira ainsi des plants supplémentaires de haute qualité qui peuvent être utilisés pour compenser les pertes attribuables à la manutention, etc.

Semis et germination

Le semis des graines est une étape simple, mais critique de la culture des plants. Idéalement, les producteurs devraient utiliser un milieu de croissance qui offre un bon drainage, une bonne capacité de rétention d'eau et une bonne aération, comme les micromottes de laine de roche. Ces substrats sont disponibles en différentes tailles, soit dans des plateaux en polystyrène, soit dans des plats en plastique.

Déposer les graines sur la surface alvéolée ou dans le trou de la micromotte et recouvrir d'une vermiculite de granulation moyenne. Une profondeur d'enfouissement constante est indispensable pour s'assurer de l'uniformité de la levée et de la croissance des plantules. La semence enfouie trop profondément dans le substrat peut mettre 23 jours de plus à lever et risque de donner une plantule qui manque de vigueur et est plus lente à produire des feuilles vraies. Par contre, une graine placée à la surface est susceptible de se dessécher. Dans certains cas, la racine peut ne pas s'ancrer correctement, provoquant la chute des plantules.

Avant les semis, laisser le temps au substrat de bien absorber soit de l'eau claire, soit une solution nutritive complète diluée (ayant une conductivité électrique [CÉ] de 1,0 à 1,5 mS/cm) à 20-25°C. Une fois les graines semées, arroser délicatement le substrat de manière à humecter la vermiculite. Placer de préférence les caissettes ou plateaux dans une chambre de germination ou sur des tables avec une source de chaleur sous les caissettes ou la source de chaleur sous la table. Couvrir les caissettes qui ont été placées sur les tables d'une pellicule de plastique clair de 2 mm pour prévenir l'assèchement (Figure 38). Afin de garantir une levée uniforme et rapide, maintenir la température du substrat à la température idéale indiquée dans le Tableau 20.

Tableau 20. Exigences relatives aux semences et température idéale du milieu de germination

Culture	Nombre de plants nécessaires	Nombre de graines commandées	Température du milieu de croissance (°C)
Tomate	10 000	12 000-13 000	25
Concombre	6 500	7 500 ¹	27
Poivron	10 000	12 000-13 000	26
Laitue	1 000	1 100-1 200	16-18

¹ Les semences de concombres offrent en général des taux de germination et de levée plus élevés.



Figure 38. Installation pour la germination de semences.

Une fois que 60 à 75 % des graines ont levé, retirer les caissettes ou plateaux de la chambre de germination ou enlever la pellicule de plastique. On procède normalement à cette opération de 50 à 96 heures après les semis, selon la culture et le cultivar utilisé. Si l'on procède à cette étape trop tôt, la levée des graines de catégories II et III sera retardée. Par contre, si l'on attend trop, les plantules déjà levées issues des graines de catégorie I risquent de s'étioler. Passé le point où une majorité de plants (plus de 80 %) ont levé, abaisser graduellement la température de l'air à 19-20°C pour les tomates, à 21°C pour les concombres, et à 20°C pour les poivrons. Dans la plupart des cas, une baisse de 1°C/jour est idéale. Régler les températures en fonction de l'intensité lumineuse afin d'obtenir les plants au moment souhaité. Un écart trop important entre les températures diurnes et nocturnes donne des plants étiolés.

Une fois que les feuilles vraies sont apparues, arroser les caissettes avec une solution nutritive complète, en commençant par une CÉ de 1,0 mS/cm et en haussant graduellement la CÉ jusqu'à environ 3,0 mS/cm avant le repiquage. Un arrosage trop abondant nuit à l'aération du substrat et par voie de conséquence à la croissance des racines. De plus, une humidité excessive (surtout si elle est appliquée par brumisation) fait aussi baisser la température dans la zone racinaire, ce qui retarde la croissance et augmente la variabilité d'un plant à l'autre. Si le substrat est trop sec, la croissance est plus lente, les feuilles ont tendance à être plus petites et la CÉ du substrat augmente. Les plants plus faibles risquent de ne pas survivre ou, s'ils survivent, d'être plus vulnérables aux maladies.

Repiquer les plantules dans des blocs de laine de roche une fois qu'elles ont atteint la taille souhaitée. Un séjour trop long dans les caissettes (plus de 21 jours dans le cas des tomates et des poivrons et plus de 10 jours dans le cas des concombres) entraîne le surpeuplement, à son tour responsable de l'étiollement et de l'affaiblissement des plants.

L'enrichissement en dioxyde de carbone (CO₂) et le recours à l'éclairage au sodium à haute pression améliorent la croissance et favorisent l'enracinement. Voici les principes à garder à l'esprit :

- Dans de bonnes conditions de luminosité, enrichir en CO₂ à 1 000 ppm. Comme les jeunes plants sont extrêmement sensibles, il est indispensable d'utiliser une source de CO₂ qui soit propre, du CO₂ sous forme liquide, par exemple.
- Une source d'éclairage d'appoint de 40 W/m² provenant de lampes au sodium à haute pression améliore la croissance des plantules. Adopter une photopériode de 18 heures pour la culture de la tomate, du poivron et de la laitue, et une photopériode de 24 heures pour celle du concombre.

Culture des plants

Les semis sont prêts à être transplantés lorsque les premières vraies feuilles ont complètement émergé ou lorsque les semis se touchent. En moyenne, les tomates sont prêtes à être transplantées de 14 à 21 jours; les concombres de 7 à 10 jours; et les poivrons de 14 à 21 jours après les semis.

Toutefois, ce moment varie selon :

- le cultivar;
- la vigueur du jeune plant;
- la lumière;
- la température;
- la nutrition;
- l'humidité.

On vise à obtenir des plantules courts et robustes. Idéalement, les semis devraient avoir une tige épaisse, des feuilles vert foncé et un système racinaire bien développé remplissant le bouchon. Avant de déloger les micromottes,

faire tremper les plateaux dans une solution nutritive, afin de permettre aux micromottes de glisser facilement hors des alvéoles. Manipuler les plantules avec soin. La tige peut être très fragile et cassante lorsqu'on la manipule, ou molle et facile à endommager. Utiliser un éjecteur pour déloger les plantules des alvéoles. Tenir les plantules par les cotylédons.

Avant d'y repiquer les plantules, bien imbiber les blocs de laine de roche d'une solution nutritive complète (CÉ de 2,0 mS/cm; pH de 5,8) en immergeant les blocs dans une cuve remplie d'une solution nutritive ou en les arrosant au moyen du système d'irrigation par aspersion. Il est important de faire tremper les blocs soigneusement et uniformément pour assurer un bon établissement des semis. Des blocs secs empêchent les racines de se développer et de croître, ce qui augmente la variabilité d'un plant à l'autre.

Déposer les micromottes dans les trous pratiqués dans les blocs. Une pratique courante utilisée pour les tomates, et de plus en plus pour les poivrons, consiste à plier la partie inférieure de la tige dans le trou et à pousser le bouchon racinaire vers le bas pour remplir le trou. Des racines se développeront le long de la tige à l'intérieur du trou, ancrant le plant et maintenant les feuilles cotylédonaires plus près de la surface du bloc de laine de roche. Cette technique aboutit à une transplantation plus robuste qui peut aider à l'abaissement futur du plant, mais elle nécessite des plantules mous et faciles à manipuler.

Placer les plantules dans des plateaux (4-8 blocs/plat standard) qui sont ensuite placés sur des tables chauffantes ou sur un sol en béton chauffé. Sinon, placez les plantules directement sur le sol (système de reflux et d'inondation) à raison de 24 à 36 plantes/m² (Figure 39). Les plants repiqués sont prêts à être transplantés directement dans le matelas de laine de roche, le sac de substrat ou les rigoles du système de culture sur film nutritif (TCFN), dans la zone de production principale aux stades suivants :

- tomate — premières fleurs;
- concombre — 45 feuilles vraies sont visibles;
- poivron — épanouissement de la fleur au niveau de la première ramification.

Remarque

Il faut que les racines soient bien développées dans le bloc sans toutefois être trop denses, afin qu'elles puissent pénétrer rapidement dans le substrat une fois que les plants sont placés dans la serre de production.



Figure 39. Production des plants.

Au besoin, tuteurer les plants à l'aide de fines tiges de bambou de 20 à 30 cm de long. Le tuteurage contribue à l'obtention de plants plus gros, donc plus faciles à manipuler, et permet d'attendre plus longtemps avant d'avoir à attacher les plants après la transplantation.

On peut aussi déplacer les nouveaux plants directement dans les serres de production. Placez les blocs sur le matelas de laine de roche à côté du trou et placez les goutteurs dans le bloc. Utilisez le système d'irrigation pour arroser les blocs. Cette méthode réduit les coûts de main-d'œuvre, mais engendre des coûts de chauffage plus élevés du fait de la nécessité de chauffer toute la serre.

Après la transplantation, maintenir la température de la serre à 23-25°C, jour et nuit, pendant 3 à 4 jours, puis abaisser graduellement la température. Dans une serre de démarrage, un éclairage d'appoint fournissant 40 watts/m² et une concentration de CO₂ de 1000 ppm permettent d'augmenter la vitesse d'enracinement et de croissance des pousses, ce qui favorise une formation plus rapide des boutons à fleurs. Adopter une photopériode de 18 heures pour les poivrons et les tomates et de 24 heures pour les concombres. Un éclairage supplémentaire n'est pas efficace si les plants sont placés directement dans la serre de production, mais un supplément de CO₂ est

bénéfique. Utilisez 1 000 ppm les jours ensoleillés et 400-500 ppm les jours nuageux.

Irriguer les plantules avec une solution nutritive complète. Arroser les plants avec une solution nutritive complète en commençant par une faible CÉ (2 mS/cm) et en augmentant graduellement la CÉ de 0,25 mS/cm/jour, jusqu'à 3 mS/cm, soit l'équivalent de la CÉ des solutions réservées aux plantules levées. Afin de maintenir une croissance maîtrisée, accroître encore davantage la CÉ si :

- la vitesse de croissance des plants est trop rapide;
- la lumière disponible est faible;
- la température dans la serre est basse;
- l'humidité relative (HR) est élevée;
- l'humidité dans le bloc est élevée.

Quand arroser

Arroser au moment opportun en veillant à ce que les feuilles ne restent pas mouillées pendant de longues périodes, surtout vers la fin de la journée. Utiliser un système d'arrosage par aspersion ou un système d'irrigation souterraine. Recourir à la méthode de pesée décrite ci-dessous pour savoir quand arroser :

1

Peser plusieurs blocs contenant des plants au moment où ils sont saturés d'eau de manière à obtenir une donnée de référence.

2

Surveiller quotidiennement le poids de plusieurs blocs.

3

Commencer à arroser lorsque le poids moyen des blocs correspond à 50 % de leur poids lorsqu'ils sont saturés.

4

À chaque arrosage, s'assurer de bien saturer à nouveau les blocs.

Les plantules placées directement dans la serre de production nécessitent un arrosage plus fréquent, car l'humidité relative plus faible dans la serre signifie qu'elles perdent de l'eau à la surface du bloc ainsi que par transpiration. Il arrive qu'il faille arroser la nuit par temps froid si l'humidité dans la serre est faible.

Greffage

La greffe des cultivars souhaités sur des porte-greffes avec des systèmes racinaires plus forts est une pratique courante. Les renseignements sur le greffage sont fournis par les fournisseurs de semences. Les plants de tomates et d'aubergine sont beaucoup plus souvent greffés que ceux de concombres et de poivrons. Le cultivar retenu (le greffon) est fixé au porte-greffe choisi en fonction de la robustesse de son système racinaire et de sa plus grande résistance aux maladies.

Le greffage sert à :

- pallier la faible résistance ou tolérance aux maladies des cultivars qu'on souhaite produire;
- améliorer la vigueur et le rendement des plants dans les serres sous des conditions de climat et de zone racinaire plus variées.

Voici une marche à suivre qui augmente les chances de réussite du greffage :

- Semer le cultivar devant servir de porte-greffe de 4 à 10 jours avant le cultivar retenu. Cette différence dépendra du porte-greffe utilisé.
- Une fois que les feuilles vraies commencent à apparaître (environ 1415 jours après les semis), abaisser la température pendant 2 à 3 jours pour renforcer les tiges (Figure 40A).
- Réserver un endroit précis qui peut être isolé pour le greffage. Stériliser toutes les surfaces. Minimiser le trafic croisé des travailleurs pour réduire le risque de contamination.
- À l'aide d'une lame de rasoir acérée, couper le porte-greffe selon un angle de 45 degrés sous les cotylédons (Figure 40B).
- Glisser la pince à l'emplacement de la coupure sur le porte-greffe (Figure 40C).
- De même, couper le cultivar souhaité au-dessus du cotylédon à un angle de 45 degrés. S'assurer que le greffon a approximativement le même diamètre que le porte-greffe. Ensuite, glisser le greffon dans la pince fixée au porte-greffe (Figure 40D). Aligner les coupes de manière à ce que les surfaces coupées se touchent. Les coupes doivent correspondre pour assurer le succès (Figure 40E, Figure 40F, Figure 41).

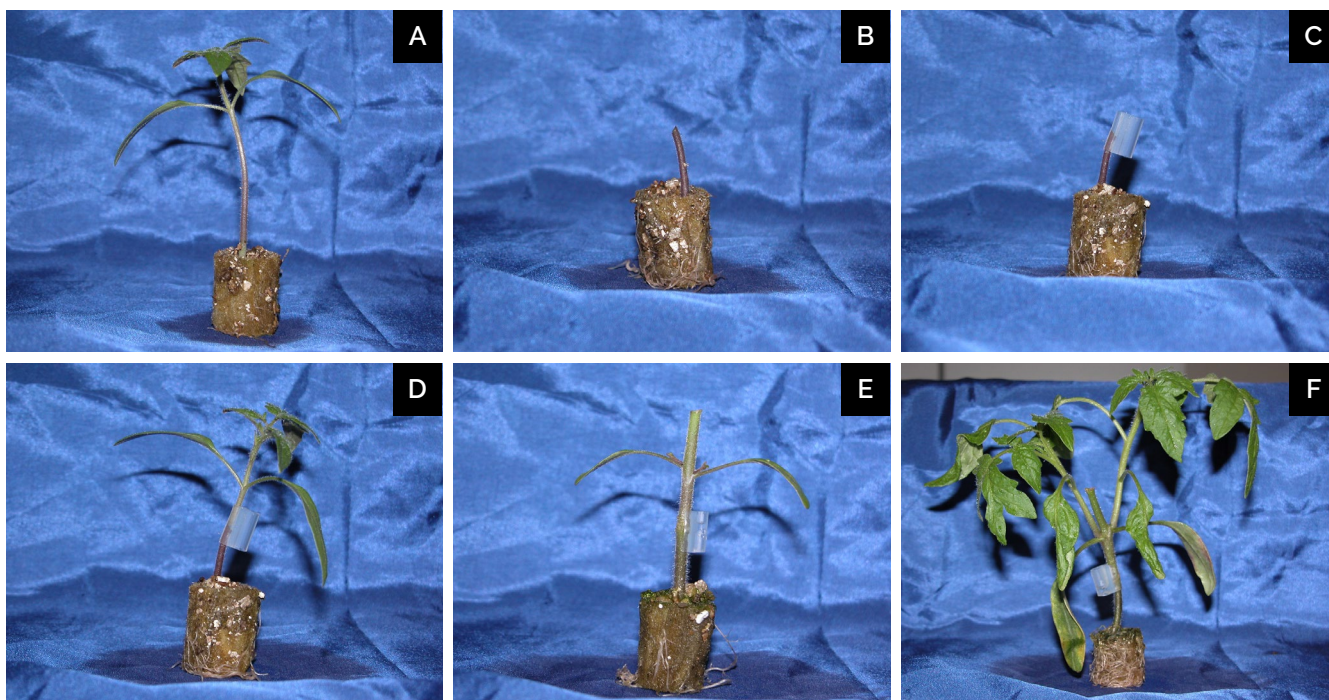


Figure 40. (A) Porte-greffe prêt pour la greffe, (B) porte-greffe avec le dessus retiré. (C) Porte-greffe avec pince ajoutée, (D) Greffon placé dans la pince, (E) Greffe finie surmontée d'une feuille de cotylédon (F) Greffe finie avec deux tiges prêtes à transplanter.

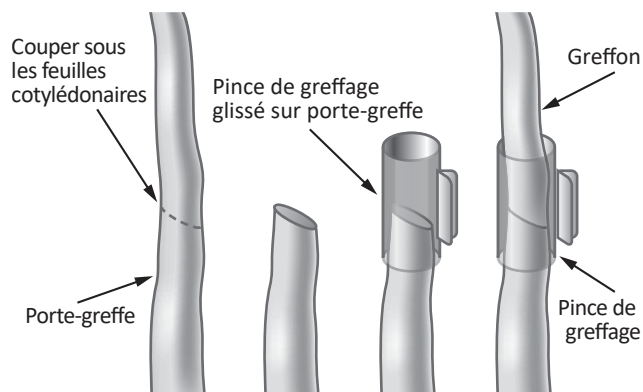


Figure 41. Greffage supérieur japonais.

Remarque

Veiller à maintenir en tout temps la stérilité de l'aire de travail et du matériel utilisé. Ne pas retarder le greffage une fois l'opération commencée, car les pertes d'eau des surfaces coupées retarderaient la fusion du porte-greffe et du greffon.

Après la greffe :

- Placer les plants greffés dans une chambre ou sous une bâche formant une tente dans la serre, afin de créer un milieu où la lumière,

la température et l'humidité sont réglées de manière à limiter au minimum les pertes d'eau chez les plantules greffées et à favoriser la soudure rapide du porte-greffe et du greffon.

- Après 3-4 jours, et au cours des 3-4 jours qui suivent, acclimater graduellement les plantules greffées aux conditions ambiantes.
- Repiquer les plantules dans des blocs 10 à 12 jours après le greffage.
- Utiliser des techniques normales de transplantation pour cultiver les plants. Transplanter les plants dans la zone de production une fois qu'ils auront atteint la hauteur et le stade de développement souhaités.

Les plants greffés ont tendance à être vigoureux et cultivés dans des conditions qui favorisent la phase de fructification, voir le [chapitre 1, Phases végétative et de fructification](#) pour plus de renseignements. Sans conditions de fructification, le premier ensemble peut avoir des fleurs difformes et des fruits petits ou de mauvaise qualité ou, dans le pire des cas, des fleurs avortées.



CHAPITRE 12

Nutriments et tests d'analyse

Comme les systèmes de culture hors sol (CHS) ont un pouvoir tampon relativement faible, tous les éléments fertilisants ajoutés au substrat sont généralement assimilables par la culture (Tableau 23). Les producteurs qui ont recours à des systèmes de CHS pour produire leurs légumes de serre doivent donc calculer les apports de fertilisants avec précision. Les plants réagissent assez rapidement aux éventuelles erreurs de fertilisation. Heureusement, ils réagissent rapidement à la correction de ces erreurs. Les producteurs peuvent faire des analyses sur place avec des trousse à échelles colorimétriques et des trousse d'analyse d'un seul élément pour vérifier plus souvent certains macro-éléments, les analyses faites en laboratoire sont plus précises.

La plupart des nutriments sont immobiles, car ils se déplacent passivement avec l'eau dans le xylème. Certains nutriments, tels que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) et le magnésium (Mg), sont mobiles, car la plante les déplace activement avec des sucres dans le phloème. Les nutriments immobiles sont transportés vers les extrémités des feuilles et les fruits par la traction de la transpiration de l'eau et ils atteignent les

parties inférieures du plant plus facilement que les parties supérieures des plants. Par conséquent, leurs symptômes de carence apparaissent généralement dans les parties supérieures du plant en premier. Les nutriments mobiles, d'autre part, sont activement déplacés avec des sucres vers les régions de croissance supérieures du plant. Par conséquent, leurs symptômes de carence apparaissent généralement dans les parties inférieures du plant en premier (Figure 42).

Analyse de la solution nutritive

L'analyse fréquente et périodique des solutions nutritives permet de détecter des tendances dans les concentrations d'éléments nutritifs avant que les problèmes ne surgissent. Dans le cas de la culture sans sol (laine de roche, fibre de coco, etc.), pour s'assurer d'une fertilisation suffisante et déterminer les corrections à apporter en fonction des conditions météorologiques et des prélèvements d'éléments nutritifs par les végétaux, analyser tous les 7 à 14 jours :

- la solution nutritive (solution appliquée à la culture);
- la solution qui se trouve dans la zone racinaire (solution extraite du sac);
- les eaux de percolation (solution de lessivage récupérée du sac).

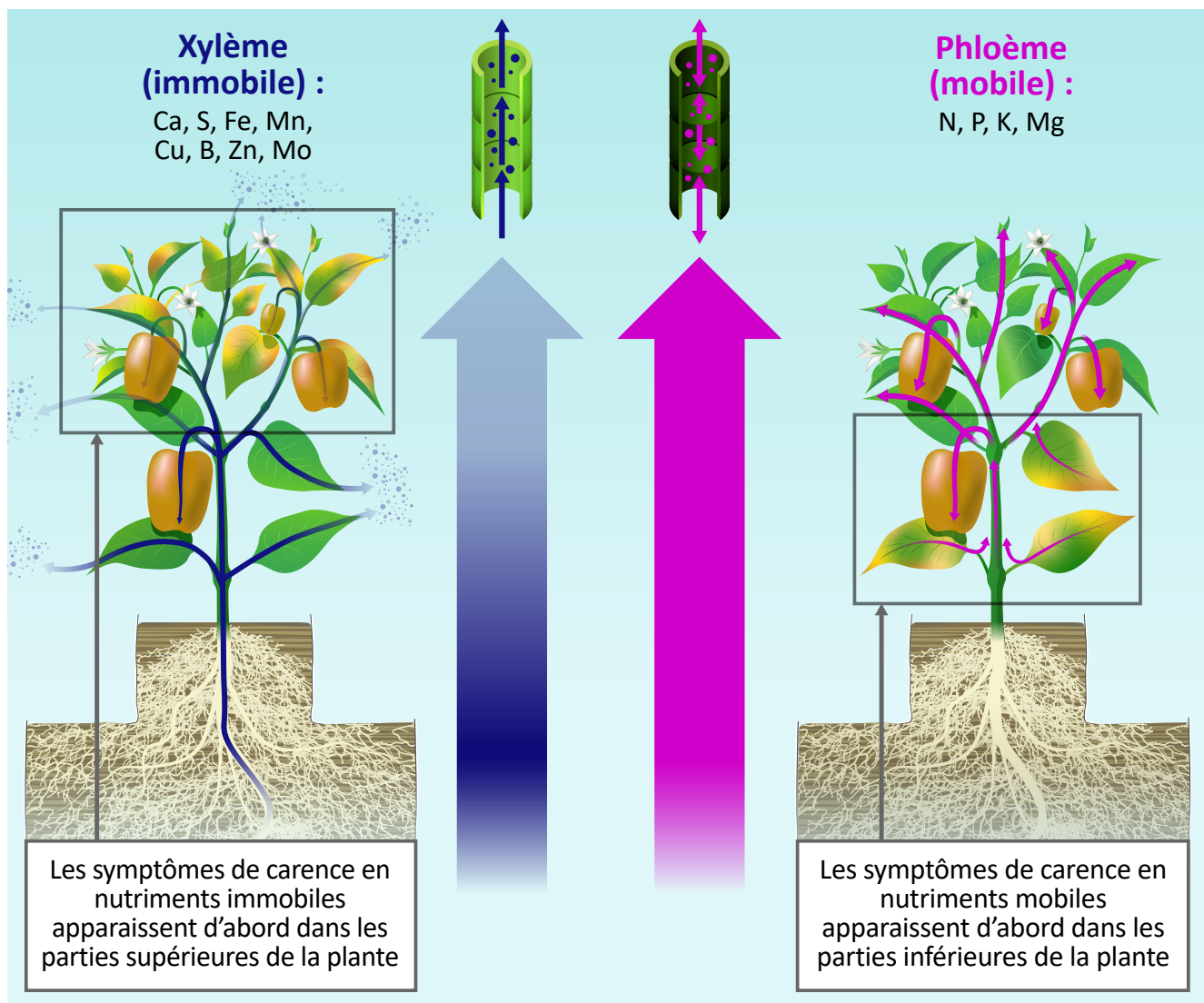


Figure 42. Comparaison des nutriments immobiles (à gauche) et des nutriments mobiles (à droite).

Ces analyses sont encore plus cruciales quand on pratique le recyclage de la solution nutritive. Il est également important de surveiller les variations dans les ions, comme les ions sodium et les ions chlorures qui ne sont pas nécessaires à la croissance des plants, étant donné que ces éléments ont tendance à s'accumuler dans la solution nutritive et à ralentir la croissance des plants.

Dans le cas de la culture sur film nutritif (TCFN), une analyse hebdomadaire de la solution nutritive prélevée dans le bassin fournit le même genre d'information. Chaque test doit comprendre une analyse du pH, de la CÉ, des macronutriments et des micronutriments (Tableau 21).

Outre l'analyse des nutriments, il est également recommandé de procéder au dépistage des microbes dans l'eau, comme indiqué plus en détail au [chapitre 7, Filtration et désinfection en plusieurs étapes](#), et d'évaluer les niveaux d'oxygène dissous, comme indiqué au [chapitre 8, Milieux de culture](#).

Analyses tissulaires et foliaires

Les analyses sur les plants fournissent des renseignements sur l'état nutritionnel de la culture, bien qu'une teneur adéquate en nutriments foliaires n'indique pas nécessairement que la plante n'est pas limitée par l'approvisionnement en nutriments. Des analyses périodiques indiquent les tendances

et permettent ainsi de mettre en place des mesures correctives avant que les problèmes n'apparaissent. Effectuer une analyse foliaire au moins une fois par mois.

Voici, pour chaque culture, la feuille spécifique qui sert à l'analyse :

- tomate — la 5^e feuille de la tige principale, à partir du point de croissance;
- concombre — la 3^e feuille à partir du point de croissance ou, après le pincement de la tige principale, feuille d'une tige latérale dans la partie supérieure du feuillage (afin qu'elle contienne suffisamment de tissu à analyser, la feuille doit faire environ 10 cm de large);
- poivron — une nouvelle feuille entièrement déployée se trouvant à environ 15 cm du point de croissance;
- aubergine — une nouvelle feuille entièrement déployée se trouvant à environ 15 cm du point de croissance;
- laitue — une feuille à maturité;
- fraise — une jeune feuille mature du milieu de la couronne.

Il est important de souligner que si les feuilles ont été pulvérisées, en particulier avec une solution nutritive, elles doivent être rincées avec de l'eau désionisée ou distillée avant d'être envoyées à un laboratoire pour analyse.

Réunir les échantillons prélevés sur plusieurs plants, les envelopper d'un essuie-tout, les glisser dans un sac de plastique propre et scellé,

puis insérer le sac dans une enveloppe brune ordinaire. Expédier l'enveloppe par la poste ou par messagerie au laboratoire. Les résultats de la plupart des laboratoires comprendront la plage acceptable pour les nutriments pour différentes cultures et les résultats peuvent également être comparés aux valeurs du [Tableau 22](#).

Analyses de sol

Dans le cas des légumes de serre cultivés sur sol, effectuer une analyse de sol avant les plantations, afin d'établir les programmes de fertilisation préplantation et post-plantation. Des analyses périodiques du sol et des tissus durant la saison de croissance sont indispensables si l'on veut veiller à ce que les cultures reçoivent une fertilisation adéquate ([Tableau 21](#)).

Pendant la saison de croissance, une analyse du sol toutes les 2 semaines contribue à maintenir un programme de fertilisation idéal. Les échantillons de sol doivent être représentatifs du type de sol dans la serre. À l'aide d'une sonde de sol, prélevez des échantillons à plusieurs endroits de la serre jusqu'à une profondeur de 20 cm. Mélangez ces échantillons et envoyez ce mélange au laboratoire pour analyse. Gardez les échantillons séparés s'il existe différents types de sol ou s'il existe une zone à problème spécifique. Cela permet d'établir des programmes d'engrais spécifiques pour ces endroits.

Tableau 21. Directives d'analyse des substrats utilisés dans les serres par la méthode des extraits boueux¹

Légende : S.O. = Sans objet

Analyse	Faible	Acceptable	Optimal	Élevé	Très élevé
Sel soluble (mS/cm)	0-0,75	0,75-2,0	2,0-3,5	3,5-5,0	5,0 et plus
Nitrates-N (ppm)	0-39	40-99	100-199	200-299	300 et plus
Phosphore (ppm)	0-2	3-5	6-10	11-18	19 et plus
Potassium (ppm)	0-59	60-149	150-249	250-349	350 et plus
Calcium (ppm)	0-79	80-199	200 et plus	S.O.	S.O.
Magnésium (ppm)	0-29	30-69	70 et plus	S.O.	S.O.

¹ Cette technique consiste à créer une pâte avec un échantillon de sol et de l'eau distillée. La teneur en nutriments du filtrat est ensuite analysée. *Source :* L'information présentée dans ce tableau a été colligée sur de nombreuses années par le personnel d'Agriculture et Agroalimentaire Canada et du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de l'Agroentreprise de l'Ontario (MAAAO) au Centre de recherche et de développement de Harrow et par le personnel du MAAA0 à Vineland.

Tableau 22. Guide de la teneur en nutriments des tissus foliaires des légumes et des fruits de serre

Légende : S.O. = Sans objet

Élément	Tomate	Concombre	Poivron	Aubergine	Laitue	Fraise ¹
Macronutriments (%)						
Azote	4,0-5,5	4,0-6,0	3,5-5,5	4,0-5,0	4,0-5,0	1,9-2,8 ¹
Phosphore	0,3-0,65	0,6-1,0	0,4	0,3-0,6	0,6-0,8	0,25-0,4
Potassium	3,5-5,0	3,5-4,0	5,0-5,9	3,50-5,0	7,8-13,6	1,6-2,5
Calcium	1,6-3,2	2,4-3,2	2,8-3,2	1,0-2,50	0,8-1,2	0,7-1,7
Magnésium	0,36-0,5	0,36-0,5	0,5-0,75	0,3 à 1,0	0,25-0,5	0,3-0,49
Soufre	1,3	0,3	0,5	S.O.	0,3	0,4-0,6
Micronutriments (ppm)						
Manganèse	55-165	55-165	55	40-250	55-110	50-200
Cuivre	5-10	7-12	5-10	S.O.	6-15	7-19
Zinc	30-50	40-60	30-60	S.O.	30-40	20-49
Bore	55-75	55-75	55-75	25-75	40-50	30-64
Fer	85-110	85-110	112	50-300	85-110	60-250

¹ <https://www.haifa-group.com/crop-guide/vegetables/strawberry-fertilizer/crop-guide-strawberry-1>

Source : L'information présentée dans ce tableau a été colligée sur de nombreuses années par le personnel d'Agriculture et Agroalimentaire Canada et du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de l'Agroentreprise de l'Ontario (MAAAO) au Centre de recherche et de développement de Harrow et par le personnel du MAAAO à Vineland.

Tableau 23. Fonction et mobilité des nutriments et symptômes de carence et de toxicité

Nutriment (mobilité)	Fonction	Symptôme de carence	Symptôme de toxicité
Macronutriments			
<p>N Azote (mobile)</p>	Vigueur des plants et formation des acides aminés.	<ul style="list-style-type: none"> • Feuillage inférieur vert clair ou plant entier dans les cas plus graves. • Fleurs jaune pâle avec des têtes minces, peu vigoureuses et des plants rigides et épineux avec de petits fruits. 	<ul style="list-style-type: none"> • Croissance végétative, tiges épaisses et fortes, feuilles bouclées et gros bouquets de fleurs. • Mauvais développement des fleurs et ensemble de fruits avec une mauvaise qualité de fruits. • Lésions profondes foncées sur les tiges si la toxicité est grave. • Réduction de l'absorption de K.
<p>P Phosphore (mobile)</p>	Croissance, fructification et production d'énergie.	<ul style="list-style-type: none"> • Face inférieure pourpre des feuilles, des veines des feuilles et de la tige. • Couleur vert bleuâtre de la face supérieure de la feuille. • Croissance mince et mauvais développement des grappes, retard de croissance, mauvaise couleur des racines, petites feuilles frisées et mauvais développement des fleurs. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu fréquents.
<p>K Potassium (mobile)</p>	Qualité, saveur et couleur des fruits. Le rapport N:K est important (un rapport plus élevé entraîne une croissance plus lente).	<ul style="list-style-type: none"> • Marges jaunes des feuilles. • Feuilles brûlées aux extrémités, et une certaine chlorose interveinale. • Plants rabougris et rigides, apparition de taches au mûrissement, fruits carrés et coins verdâtres. • Réduction de la prise et du poids des fruits. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de l'absorption de N et de Mg.
<p>Mg Magnésium (mobile)</p>	Qualité des fruits, chlorophylle et photosynthèse.	<ul style="list-style-type: none"> • Jaunissement interveinal et chlorose des feuilles plus âgées. • Face inférieure violette des feuilles si sévère et mauvaise qualité des fruits. • Lié à un taux de K élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu fréquents.
<p>Ca Calcium (immobile)</p>	Intégrité de la paroi et de la membrane cellulaires, élongation et division cellulaires et qualité des fruits.	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de turgescence, taches sur la tige supérieure, feuilles supérieures foncées accompagnées de bords jaunissants et de racines pauvres. • Pourriture de fin de floraison sur les fruits et dépérissement sur les pointes de croissance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Moucheture dorée.
<p>S Soufre (immobile)</p>	Composant des acides aminés.	<ul style="list-style-type: none"> • Peu fréquents. • Retard de croissance, production de fruits réduite et feuilles jaune pâle. 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux élevé de sels. • Réduction de l'absorption du Mo.









Mobile



Immobile

[suivant >>](#)

Tableau 23. Fonction et mobilité des nutriments et symptômes de carence et de toxicité (*suite*)

Nutriment (mobilité)	Fonction	Symptôme de carence	Symptôme de toxicité
Macronutriments			
 <p>26 Fe Fer (immobile)</p>	Chlorophylle et photosynthèse.	<ul style="list-style-type: none"> Chlorose dans les jeunes feuilles supérieures et la tige et apparition de taches brunes. Retard de croissance. 	<ul style="list-style-type: none"> Peu fréquents.
 <p>25 Mn Manganèse (immobile)</p>	Réactions enzymatiques et photosynthèse.	<ul style="list-style-type: none"> Chlorose interveinale et veines vert clair. Devient plus jaune et des taches brunes apparaissent à la base des folioles. Principalement des feuilles supérieures plus jeunes. Semblable à une carence en Fe, mais les veines restent vertes et les symptômes peuvent progresser vers le bas du plant. 	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de l'absorption de Fe.
 <p>29 Cu Cuivre (immobile)</p>	Réactions enzymatiques et photosynthèse.	<ul style="list-style-type: none"> Des feuilles plus jeunes vert foncé qui flétrissent fréquemment. Rabougrissement des plants. Tiges et feuilles plus minces, feuilles bouclées et chlorose et nécrose éventuelles. Floraison retardée et mauvais enracinement. 	<ul style="list-style-type: none"> Brûlure de l'extrémité des racines. Chlorose sur les jeunes feuilles, semblable à une carence en Fe.
 <p>5 B Bore (immobile)</p>	Développement du méristème, développement de la paroi cellulaire, pollinisation des fruits et transport du sucre.	<ul style="list-style-type: none"> Feuilles cassantes, flétrissement prématuré et dépérissement des pointes en croissance. Couleur jaune ou brun orangé le long des marges des feuilles supérieures, défaut de production des fruits et chute des fruits. Taches d'apparence du liège autour du calice. 	<ul style="list-style-type: none"> Chlorose
 <p>Zn Zinc (immobile)</p>	Réactions enzymatiques.	<ul style="list-style-type: none"> Peu fréquents. Chlorose interveinale et nécrose des feuilles inférieures plus âgées. Allongement des feuilles, retard de croissance et réduction de la production de fruits. 	<ul style="list-style-type: none"> Peu fréquents.
 <p>42 Mo Molybdène (immobile)</p>	Réactions enzymatiques.	<ul style="list-style-type: none"> Chlorose, enroulement des marges des feuilles, retard de croissance et zone interveinale petite jaune pâle ou blanche qui se propage vers l'intérieur sur la surface des jeunes feuilles. Les feuilles inférieures peuvent flétrir et jouer un rôle prématurément. 	<ul style="list-style-type: none"> Peu fréquents.

[« précédent](#)

 Mobile  Immobile

Glossaire

Acclimatation photosynthétique — où le taux de photosynthèse diminue et les avantages de niveaux élevés de CO₂ ne sont pas aussi prononcés qu'ils l'étaient lorsque les plants y ont été exposés pour la première fois.

Chélates — composés chimiques qui interagissent avec les ions métalliques tels que le fer pour leur permettre de se dissoudre dans l'eau et d'être disponibles pour être absorbés par les plants.

Conductivité électrique (CÉ) — mesure de la salinité de l'eau et du total des sels dissous ou des ions totaux présents dans une solution en milliSiemens par centimètre (mS/cm).

Déficit de saturation (DS) — différence entre la tension de vapeur à l'intérieur et l'air à l'extérieur de la feuille. Plus le DS est élevé, plus le taux de transpiration et de perte d'eau est élevé.

Demi-vie — temps nécessaire à une réaction chimique pour convertir 50 % d'un produit.

Densité de flux photonique photosynthétique (PPFD) — intensité du rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) et mesurée en $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{seconde}$.

Distribution de la lumière — options d'éclairage qui comprennent l'éclairage supérieur (au-dessus de la canopée), l'éclairage d'appoint (à l'intérieur de la canopée) ou une combinaison des deux. Les luminaires à vapeur de SHP et à DEL peuvent être utilisés de différentes manières.

Dose — volume et période d'un traitement donnée (quantité et durée).

Échange d'air par heure — nombre de fois qu'une serre échange tout son air avec l'air extérieur en une heure.

État d'ameublissement — état physique du sol lorsque les roches et autres débris ont été enlevés.

Humidité relative (HR) — le rapport entre la quantité réelle de vapeur d'eau présente dans un volume d'air donné (c.-à-d., humidité absolue)

et la quantité maximale de vapeur d'eau qui peut être contenue dans ce volume d'air à une température donnée.

Hyperfiltre — filtres généralement utilisés en osmose inverse avec une taille de pores de 0,0001 μm .

Intégrale de lumière quotidienne (DLI) — résultat du calcul lorsque vous multipliez l'intensité lumineuse (en moles/m²/heure) par la photopériode (en heures). Il s'agit de la quantité totale de lumière accumulée que les plants reçoivent en une journée, mesurée en moles (mol/m²/jour).

Intensité lumineuse — également appelée densité de flux photonique photosynthétiques (PPFD), soit la mesure de la quantité de RPA que les plants reçoivent en micromoles (μmol) par mètre carré (m²) par seconde.

Irrigation fertilisante — application d'engrais et d'eau par un système d'irrigation.

Longueur d'onde — longueur d'onde que le photon lumineux parcourt, qui peut être mesurée en nanomètres (nm). Chaque longueur d'onde est associée à une énergie et à une couleur de lumière différentes.

Microfiltres — filtres dont la taille des pores est de 50 μm .

Nanofiltres — filtres avec une taille de pores de 0,01 μm .

Nutriments immobiles — nutriments qui se déplacent passivement avec l'eau dans le xylème par la traction de la respiration.

Nutriments mobiles — nutriments qui se déplacent activement dans la plante avec les sucres dans le phloème.

Photons — particules de lumière qui se déplacent comme des vagues.

Photopériode — la durée pendant laquelle il y a de la lumière, qu'il s'agisse de la lumière du soleil ou de la lumière artificielle, et elle est généralement mesurée en heures. Lorsque vous multipliez l'intensité lumineuse (mol/m²/heure)

par la photopériode (en heures), vous obtenez l'intégrale de lumière quotidienne (DLI). Il s'agit de la quantité totale de lumière accumulée que les plants reçoivent en une journée (en mol/m²/jour).

Photosynthèse — processus par lequel les plants utilisent certaines longueurs d'onde de la lumière pour convertir le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau en sucres (glucides) et en oxygène.

Plants en phase de fructification — plants qui produisent des feuilles plus petites, des tiges minces et des fleurs plus petites et plus nombreuses qui sont bien en évidence.

Plants en phase végétative — plants qui produisent des feuilles plus grandes, épaisses et vert foncé que les fleurs et les fruits, et des fleurs moins grosses et rugueuses.

Point de saturation — lorsqu'une substance contient la quantité maximale d'eau.

Rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) — soit le spectre de lumière dont la longueur d'onde se situe en 400 et 700 nm et utilisé pour la photosynthèse. Le RPA étendu (RPAé) comprend le rayonnement rouge lointain (> 700 nm).

Respiration — le processus par lequel les glucides produits par la photosynthèse sont décomposés en présence d'oxygène pour produire de l'énergie (c.-à-d. l'adénosine triphosphate [ATP]).

Spectre lumineux — il s'agit de la qualité ou de la couleur de la lumière produite par les luminaires mesurée en nanomètres (nm). La lumière blanche à large spectre couvre généralement le spectre de RPA (400-700 nm), la lumière bleue est de 400-500 nm, la lumière verte, jaune ou ambre est de 500-600 nm, la lumière rouge est de 600-700 nm et la lumière rouge lointain est de 700-800 nm.

Technique de culture sur film nutritif (TCFN) — un système hydroponique où un flux peu profond d'irrigation fertilisante descend une pente tout en entrant en contact avec les racines des plants pour permettre l'absorption des nutriments.

Tension de vapeur (TV) — le résultat de la pression exercée par la vapeur d'eau dans l'air ou à l'intérieur de la feuille. Elle est directement liée à la température et à l'HR. La TV augmente au fur et à mesure que la température et l'HR augmentent.

Transpiration — mouvement de la vapeur d'eau de la feuille dans l'atmosphère qui se produit à travers les stomates ouverts.

Ultrafiltres — filtres avec une taille de pores de 0,02 µm.

Zone racinaire — environnement où les racines résident dans un système de culture hors sol.

Annexe A. Ressources ministérielles

Centre d'information agricole

Fournit des renseignements techniques et commerciaux à l'échelle de la province aux fermes commerciales et aux agroentreprises.

Tél. : 1 877 424-1300

Courriel : ag.info.omafra@ontario.ca

ONGreenhouseVegetables

Pour les dernières informations sur les sujets suivants :

- l'agriculture commerciale en environnement contrôlé, y compris les fruits de serre, les légumes et l'agriculture verticale
- les mises à jour opportunes et des informations techniques sur la production et la lutte intégrée contre les ravageurs
- les ateliers et les webinaires de la série éducative GrowON
- les cours sur les légumes de serre

Visitez le blogue sur le site Web

ONGreenhouseVegetables.ca

Portail ontarien pour la protection des cultures

Utilisez cet outil sur n'importe quel appareil pour trouver :

- Les concentrations et les protocoles d'épandage appropriés pour les insecticides, fongicides et herbicides homologués
- Des renseignements à jour sur l'efficacité des produits contre les ennemis des cultures
- Des stratégies d'épandage pour favoriser l'intendance environnementale
- Des renseignements pour aider les producteurs à gérer la résistance aux pesticides

Visitez le portail ontarien pour la protection des cultures au Ontario.ca/protectiondescultures

Llcultures

Des renseignements sur la LI au bout de vos doigts.

Le nouvel outil de Llcultures comprend :

- Des renseignements à jour sur la LI pour les principaux ennemis des cultures de l'Ontario
- Une nouvelle fonction d'identification pour vous aider à identifier les ennemis des cultures et les problèmes
- Une offre accrue de renseignements propres aux cultures
- Des calendriers de dépistage
- Des comparaisons entre des ennemis des cultures souvent confondus
- Des détails sur les analyses de sol et les lésions causées par les herbicides

Visitez le outil de Llcultures au [Ontario.ca/licultures](https://ontario.ca/licultures)

Annexe B. Autres ressources

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC)

Agriculture et Agroalimentaire Canada soutient le secteur agricole et agroalimentaire canadien par l'intermédiaire d'initiatives qui favorisent l'innovation et la compétitivité.

<https://agriculture.canada.ca/fr>

Centres de recherche d'AAC

<https://agriculture.canada.ca/fr/science/centres-recherche-lagriculture-lagroalimentaire>

Agence canadienne d'inspection des aliments — Protection des végétaux

Services et informations sur les phytoravageurs et les espèces envahissantes, l'importation, l'exportation, le commerce, les engrais, le sol et les matières liées au sol, les céréales et les grandes cultures, les semences, le cannabis, la foresterie, l'horticulture. <https://inspection.canada.ca/fr/protection-vegetaux>

Canadian Greenhouse Conference

La Canadian Greenhouse Conference est une organisation à but non lucratif et le principal événement et point de connexion du Canada

pour les producteurs commerciaux de cultures produites dans un environnement contrôlé

<https://www.canadiangreenhouseconference.com/>

Greenhouse Canada

Magazine d'affaires national publié exclusivement pour les serriculteurs commerciaux au Canada.

<https://www.greenhousecanada.com/>

Université de Guelph — Agriculture végétale

Le département de biologie végétale appliquée le plus important et le plus diversifié du Canada. Un département à forte intensité de recherche au sein du Collège d'agriculture de l'Ontario dédié à l'enseignement, à la recherche et aux services liés aux cultures horticoles, au gazon, aux espèces paysagères et aux grandes cultures. www.plant.uoguelph.ca

Division des services de laboratoire

www.uoguelph.ca/labserv/

Annexe C. Système métrique et abréviations

Unités du SI

Unités de longueur

10 millimètres (mm) = 1 centimètre (cm)

100 centimètres (cm) = 1 mètre (m)

1 000 mètres = 1 kilomètre (km)

Unités de surface

100 m × 100 m = 10 000 m² = 1 hectare (ha)

100 ha = 1 kilomètre carré (km²)

Unités de volume

Mesure de solides

1 000 millimètres cubes (mm³) = 1 centimètre cube (cm³)

1 000 000 cm³ = 1 mètre cube (m³)

Mesure de liquides

1 000 millilitres (mL) = 1 litre (L)

100 L = 1 hectolitre (hL)

Équivalences poids-volume (pour l'eau)

(1,00 kg) 1 000 grammes = 1 litre (1,00 L)

(0,50 kg) 500 g = 500 ml (0,50 L)

(0,10 kg) 100 g = 100 ml (0,10 L)

(0,01 kg) 10 g = 10 ml (0,01 L)

(0,001 kg) 1 g = 1 ml (0,001 L)

Unités de poids

1 000 milligrammes (mg) = 1 gramme (g)

1 000 g = 1 kilogramme (kg)

1 000 kg = 1 tonne (t)

1 mg/kg = 1 partie par million (ppm)

Équivalences solides-liquides

1 cm³ = 1 mL

1 m³ = 1 000 L

Conversions métriques

5 ml = 1 c. à thé

15 ml = 1 c. à soupe

28,5 mL = 1 oz liq.

Facteur de conversion métrique pratique (approximatif)

litre/hectare × 0,4 = litre/acre

kilogramme/hectare × 0,4 = kilogramme/acre

Conversions des taux d'application

Métrique vers impérial ou américain (É.-U.A.) (approximatif)

litres par hectare × 0,09 = gallons imp. par acre

litres par hectare × 0,11 = gallons américains par acre

litres par hectare × 0,36 = pintes imp. par acre

litres par hectare × 0,43 = pintes américaines par acre

litres par hectare × 0,71 = chopines imp. par acre

litres par hectare × 0,86 = chopines É.-U.A. par acre

millilitres par hectare × 0,014 = onces liquides É.-U.A. par acre

grammes par hectare × 0,014 = onces par acre

kilogramme/hectare × 0,89 = livre par acre

tonnes par hectare × 0,45 = tonnes par acre

Impérial ou américain (É.-U.A.) à métrique

Gallons imp. par acre × 11,23 = litres par hectare (L/ha)

Gallons É.-U.A. par acre × 9,35 = litres par hectare (L/ha)

Pintes imp. par acre × 2,8 = litres par hectare (L/ha)

Pintes É.-U.A. par acre × 2,34 = litres par hectare (L/ha)

Chopines imp. par acre × 1,4 = litres par hectare (L/ha)

Chopines É.-U.A. par acre × 1,17 = litres par hectare (L/ha)

Onces liquides imp. par acre × 70 = millilitres par hectare (mL/ha)

Onces liquides É.-U.A. par acre × 73 = millilitres par hectare (mL/ha)

tonnes par acre × 2,24 = tonnes par hectare (t/ha)

livres par acre × 1,12 = kilogrammes par hectare (kg/ha)

livres par acre × 0,45 = kilogrammes par acre (kg/acre)

onces par acre × 70 = grammes par hectare (g/ha)

Conversions des unités de poids sec (approximatives)

Métrique	Impérial
grammes ou kilogrammes/hectare	onces ou livres/acre

100 g/ha = 1 ½ oz/acre

200 g/ha = 3 oz/acre

300 g/ha = 4 ¼ oz/acre

500 g/ha = 7 oz/acre

700 g/ha = 10 oz/acre

1,10 kg/ha = 1 lb/acre

1,50 kg/ha = 1 ¼ lb/acre

2,00 kg/ha = 1 ¾ lb/acre

2,50 kg/ha = 2 ¼ lb/acre

3,25 kg/ha = 3 lb/acre

4,00 kg/ha = 3 ½ lb/acre

5,00 kg/ha = 4 ½ lb/acre

6,00 kg/ha = 5 ¼ lb/acre

7,50 kg/ha = 6 ¾ lb/acre

9,00 kg/ha = 8 lb/acre

11,00 kg/ha = 10 lb/acre

13,00 kg/ha = 11 ½ lb/acre

15,00 kg/ha = 13 ½ lb/acre

Tables de conversion - métriques en impériales (approximatives)

Longueur

1 millimètre (mm) = 0,04 pouce

1 centimètre (cm) = 0,40 pouce

1 mètre (m) = 39,40 pouces

1 mètre (m) = 3,28 pieds

1 mètre (m) = 1,09 verge

1 kilomètre (km) = 0,62 miles

Surface

1 centimètre carré (cm²) = 0,16 pouce carré

1 mètre carré (m²) = 10,77 pieds carrés

1 mètre carré (m²) = 1,20 verge carrée

1 kilomètre carré (km²) = 0,39 mille carré

1 hectare (ha) = 107 636 pieds carrés

1 hectare (ha) = 2,5 acres

Volume (solides)

1 centimètre cube (cm ³) = 0,061 pouce cube
1 mètre cube (m ³) = 1,31 verge cube
1 mètre cube (m ³) = 35,31 pieds cubes
1 000 mètres cubes (m ³) = 0,81 acre-pied
1 hectolitre (hL) = 2,8 boisseaux

Volume (liquides)

1 millilitre (mL) = 0,035 once liquide (Imp.)
1 litre (L) = 1,76 pinte (Imp.)
1 litre (L) = 0,88 pinte (Imp.)
1 litre (L) = 0,22 gallon (Imp.)
1 litre (L) = 0,26 gallon (US)

Poids

1 gramme (g) = 0,035 once
1 kilogramme (kg) = 2,21 livres
1 tonne (t) = 1,10 tonne courte
1 tonne (t) = 2 205 livres

Pression

1 kilopascal (kPa) = 0,15 lb/po ²
--

Vitesse

1 mètre par seconde = 3,28 pieds par seconde
1 mètre par seconde = 2,24 miles par heure
1 kilomètre par heure = 0,62 mile par heure

Température

$$^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} \times 1,8) + 32$$

Tables de conversion - impériales en métriques (approximatives)

Longueur

1 pouce = 2,54 cm
1 pied = 0,30 m
1 yard = 0,91 m
1 mille = 1,61 km

Surface

1 pied carré = 0,09 m ²
1 yard carré = 0,84 m ²
1 acre = 0,40 ha

Volume (solides)

1 verge cube = 0,76 m ³
1 boisseau = 36,37 L

Volume (liquides)

1 once de liquide (imp.) = 28,41 ml
1 pinte (imp.) = 0,57 L
1 gallon (imp.) = 4,55 L
1 gallon (US) = 3,79 L

Poids

1 once = 28,35 g
1 livre = 453,6 g
1 tonne = 0,91 tonne

Pression

1 livre par pouce carré = 6,90 kPa

Température

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times .5556$$

Abbreviations

% = pour cent
cm = centimètre
cm ² = centimètre carré
CÉ = conductivité électrique
p. ex. = par exemple
g = gramme
h = heure
ha = hectare
HP = cheval-vapeur
J = joule
kg = kilogramme
km/h = kilomètres par heure
kPa = kilopascal
L = litre
m = mètre
m ² = mètre carré
mJ = millijoule
mL = millilitre
mol = mole
mm = millimètre
mS = milliSiemes
m/s = mètres par seconde
nm = nanomètres
ppm = parties par million
s ou sec = seconde
t = tonne
μ = micro
μm = micromètres
μmol = micromole
W = Watts



ontario.ca/cultures