



Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation
Département des sols et de génie agroalimentaire

Rapport final

Amélioration de la disponibilité et de l'absorption des éléments nutritifs par
l'oxygénéation de l'eau d'irrigation d'une culture de tomate biologique

Projet no. 07-BIO-05

Organisme requérant
Steeve Pepin, Université Laval
Martine Dorais, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Date de la fin du projet
18 juillet 2010

Table des matières

Introduction	1
Description du projet.....	1
<i>Saison de production 2008</i>	1
<i>Saison de production 2009</i>	2
Déroulement des travaux	2
<i>Site expérimental</i>	2
<i>Conditions de culture</i>	2
<i>Injection d'oxygène dans le sol et aération « mécanique » du sol</i>	3
<i>Apports de fertilisants</i>	4
<i>Paramètres du sol</i>	4
<i>Mesures agronomiques et qualité des fruits</i>	4
<i>Échanges gazeux à l'échelle de la feuille</i>	5
<i>Analyses statistiques</i>	5
Résultats obtenus et discussion	6
<i>Climat</i>	6
<i>Potentiel matriciel du sol</i>	6
<i>Oxygénation de l'eau d'irrigation</i>	7
<i>Enrichissement en oxygène à l'aide de micro-tubes enfouis dans le sol</i>	8
<i>Rendement en fruits</i>	8
<i>Courbes de réponses photosynthétiques à la lumière et au CO₂</i>	10
<i>Croissance</i>	11
<i>Flux de CO₂ à la surface du sol</i>	12
<i>Concentration en éléments nutritifs dans le sol et les feuilles</i>	13
<i>Qualité organoleptique et nutraceutique des fruits</i>	15
Biens livrés	17
Difficultés rencontrées	17

Liste des figures

Figure 1. Dispositif de l'étude réalisée en 2008 dans la serre expérimentale des Serres Jardins-Nature. Le traitement d'oxygénéation consistait à enrichir l'eau d'irrigation en oxygène (~20 ppm O ₂) à l'aide d'un réservoir d'O ₂ pur et d'un injecteur d'air Venturi (Mazzei®) installé au début de la ligne d'irrigation de chaque parcelle traitée	3
Figure 2. Dispositif de l'étude réalisée en 2009 dans la serre expérimentale des Serres Jardins-Nature. Le traitement d'oxygénéation fut appliqué en injectant de l'O ₂ pur directement dans le sol à partir d'un réseau de microgoutteurs à paroi rigide.....	3
Figure 3. Moyennes journalières (6h–20h) de la température de l'air, de la température du sol à deux profondeurs (10 et 50 cm), et de l'humidité relative observées en serre au cours des saisons de croissance 2008 et 2009	6
Figure 4. Rendement cumulatif moyen des différents traitements d'oxygénéation obtenu au cours de 25 semaines de production en 2008 et en 2009	9
Figure 5. Rendement total en fruits compilé par période de quatre semaines pour chacun des traitements d'oxygénéation	9
Figure 6. Taux de photosynthèse nette en fonction de la densité de flux de photons utiles à la photosynthèse (PPFD) pour les traitements : (i) oxygénéation de l'eau d'irrigation, binage et témoin en 2008 ; et (ii) enrichissement en oxygène, aération « mécanique » et témoin en 2009.....	10
Figure 7. Taux de photosynthèse nette en fonction de la concentration en CO ₂ dans l'air ambiant pour les différents traitements d'oxygénéation étudiés en 2008 et 2009	11
Figure 8. Flux de CO ₂ mesuré à la surface du sol dans chacune des parcelles expérimentales, à trois reprises au cours des saisons de croissance 2008 (oxygénéation de l'eau d'irrigation) et 2009 (enrichissement en O ₂ directement dans le sol).....	13
Figure 9. Concentrations moyennes en ammonium et nitrates mesurées dans l'horizon de sol 0–15 cm pour les différents traitements d'oxygénéation étudiés en 2008 et en 2009.....	13
Figure 10. Concentrations moyennes en P, K, Mg and Ca (extraits à l'eau et au Mehlich-III) mesurées dans les horizons de sol 0–15 cm et 15–30 cm pour les différents traitements d'oxygénéation étudiés en 2008 et en 2009	14
Figure 11. Effets des traitements d'oxygénéation sur le pourcentage de matière sèche, l'acidité titrable et la concentration en sucres solubles, en lycopènes et en antioxydants des fruits produits en 2008 et 2009.....	16

Liste des tableaux

Tableau 1. Concentrations journalières maximales en O ₂ dans l'eau d'irrigation (i) des parcelles enrichies en O ₂ et (ii) des parcelles témoins et aérées par binage (i.e. eau potable) en 2008 et concentrations journalières moyennes en O ₂ à 20 cm dans le sol des parcelles enrichies en 2009	7
Tableau 2. Effets des différents traitements d'oxygénéation sur le rendement total et le calibre des fruits produits au cours des saisons de production 2008 et 2009	8
Tableau 3. Effets des traitements d'oxygénéation sur les variables de croissance des plants au cours de la saison de croissance 2008 et 2009	12
Tableau 4. Effets des traitements d'oxygénéation sur le contenu en éléments nutritifs des feuilles récoltées mensuellement au cours de la saison de production 2008 (mai–octobre) et 2009 (avril–août).....	15

Introduction

Les taux de minéralisation sont généralement faibles dans les sols biologiques cultivés en serre, où les irrigations et les apports d'amendements organiques sont fréquents. Bien que la majorité du potassium et 50% du phosphore soient rapidement disponibles après un apport de compost dans le sol, seul 10% de l'azote est disponible immédiatement alors que 10% d'azote supplémentaire est minéralisé au cours de l'année. Or, une disponibilité inadéquate des éléments nutritifs constitue un frein à l'optimisation des rendements, à la qualité des fruits et à la capacité des plantes à résister aux pathogènes. Il a été démontré dans les sols à texture fine que l'oxygénéation de l'eau d'irrigation permet d'améliorer le développement des microorganismes dans le sol (minéralisation accrue), la croissance, le rendement, le calibre des fruits, leur durée post-récolte ainsi que la tolérance des plants aux pathogènes. Cette technique n'a cependant jamais été testée pour une culture biologique sous serre.

L'objectif de cette étude était de déterminer l'effet d'une augmentation de la concentration en O₂ dans le sol sur le rendement et la qualité de la tomate biologique de serre, ainsi que sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol. Ce projet visait à vérifier les hypothèses suivantes : (i) une concentration en oxygène plus élevée au niveau de la rhizosphère accroît l'activité biologique et le taux de minéralisation du sol; et (ii) une concentration en oxygène plus élevée dans le sol accroît la croissance des plants, le rendement et la qualité des fruits.

Description du projet

Saison de production 2008

Une régie de culture en sol incluant un traitement d'oxygénéation de l'eau d'irrigation a été évaluée en milieu commercial et comparée à une régie avec aération mécanique du sol par binage. Plus spécifiquement, trois traitements d'oxygénéation ayant quatre répétitions chacun ont été examinés en 2008 :

- 1) Témoin : eau d'irrigation non enrichie où la concentration en O₂ était ~4–6 ppm;
- 2) Oxygénéation : eau d'irrigation enrichie en O₂ (~20 ppm) à l'aide d'un réservoir d'O₂ pur et d'un injecteur d'air Venturi (Mazzei®) installé au début de la ligne d'irrigation de chaque parcelle traitée (eau distribuée à l'aide de microgoutteurs enfouis à 25 cm de profondeur);
- 3) Binage : eau d'irrigation non enrichie (~4–6 ppm O₂) avec binage hebdomadaire de la surface du sol (0–15 cm).

Le cultivar utilisé fut Macarena (var. Beef) greffé sur Beaufort pour une superficie totale en expérimentation de 230 m² (soit 12 parcelles expérimentales de 14,3 m² chacune et deux rangs de garde). Les plants de tomate ont été transplantés en serre le 29 janvier 2008 dans des bacs afin de réduire le choc de transplantation. Ces bacs étaient construits en polypropylène ondulé (coroplast) et étaient sans fond (dimensions d'un bac : 30 cm de haut, 20 cm de large et 7,5 m de long). La plantation a eu lieu après l'enfouissement d'une culture de seigle (*Secale cereale* L., un engrais vert cultivé durant deux à trois semaines). L'irrigation a été effectuée à l'aide de brumisateurs en surface et de microgoutteurs installés verticalement à 25 cm de profondeur (distants de 30 cm). Près de 25% du volume d'eau d'irrigation utilisé quotidiennement était fourni par les brumisateurs afin de permettre une meilleure incorporation des amendements déposés à la surface du sol. Environ 75% du volume total d'eau d'irrigation était enrichi en O₂ et acheminé par microgoutteurs à une profondeur de 25 cm dans le sol. L'irrigation fut contrôlée par tensiométrie avec un seuil de démarrage de -60 mbars (potentiel matriciel mesuré à l'aide d'hortimètres insérés à 15 cm de profondeur dans le sol de trois parcelles et enregistré en continu par un acquiseur de données). Les systèmes d'enrichissement en O₂ de l'eau d'irrigation et de tensiométrie furent pleinement opérationnels à partir du 4 avril 2008. La première collecte de données agronomiques fut réalisée en mai 2008, soit environ un mois après

le début des traitements d'oxygénation. La fin des récoltes a eu lieu le 10 novembre 2008.

Saison de production 2009

Au cours de la deuxième saison de croissance, le système d'oxygénation a été modifié afin de maintenir en tout temps une concentration en oxygène d'environ 25% dans le sol, ce qui n'était pas possible lorsque le système d'enrichissement en O₂ était tributaire de la fréquence des irrigations (*cf.* année 2008). Les traitements d'oxygénation suivants ont été étudiés en 2009 :

- 1) Témoin
- 2) Oxygénation de l'horizon de surface (0–25 cm) en injectant de l'oxygène pur directement dans le sol à l'aide d'un réseau de tubulures enfouies sous la surface de sol;
- 3) Aération « mécanique » du sol à l'aide d'un pieu métallique simulant, en quelque sorte, l'action d'un aérateur de pelouse.

Des plants de tomate de cv Macarena greffés sur Beaufort ont également été utilisés lors de ce deuxième essai. La plantation et la fin des récoltes ont eu lieu le 11 février et 28 septembre 2009, respectivement. L'irrigation de la culture fut apportée par un système de brumisateurs (Spray tube « P », Chapin Watermatics; brumisation de 180°; débit = 0,4 lpm) contrôlé par le producteur. La régie d'irrigation a été établie en fonction de la radiation solaire accumulée et du stade du développement des plants avec des seuils de démarrage et d'arrêt variant selon la saison. Il est à noter que l'eau utilisée pour irriguer les parcelles n'a pas été enrichie en O₂ durant la saison de production 2009 (la concentration en O₂ de l'eau provenant du réseau d'aqueduc était d'environ 4–6 ppm). Le potentiel matriciel du sol a été mesuré par trois hortimètres (un par traitement) et a été enregistré en continu par un acquiseur de données (CR23X, Campbell Scientific, Edmonton, Alberta).

Ainsi, deux expérimentations indépendantes ont été conduites en serre, suivant un dispositif en blocs complets aléatoires avec quatre répétitions.

Déroulement des travaux

Site expérimental

Cette étude s'est déroulée dans le complexe de serres de Serres Jardins-Nature à New Richmond au Québec (Lat. 48° 10' N; Long. 65° 50' O), où l'on cultive des tomates biologiques en plein sol. Ce complexe est constitué de serres modernes de 4,5 m de hauteur à la gouttière et recouvertes d'un double film de polyéthylène de type De Klerk traité contre la condensation. Adjacente à la serre principale se trouve une serre expérimentale d'une dimension de 230 m² (soit ~30 mètres en longueur et ~7,5 mètres en largeur; un rang de garde de chaque côté de la serre) et dont la surface de culture a été divisée en quatre blocs complets comprenant chacun trois parcelles. Les différents traitements ont été répartis aléatoirement entre les unités expérimentales. Le dispositif expérimental de l'étude est présenté aux figures 1 et 2.

Conditions de culture

Pour l'ensemble des parcelles, les paramètres climatiques (température moyenne 24-h, température de jour et de nuit, DPV) des serres ont été conduits à l'aide d'un système Argus selon le développement des plantes et les recommandations de l'expert conseil, M. Jacques Thériault. Une concentration moyenne de 500-600 µL L⁻¹ de CO₂ a été maintenue dans la serre. Tout au cours de la saison de production, les grappes ont été taillées à 4-5 fruits et les plants ont été tuteurés et taillés selon une procédure standard d'origine hollandaise. Des bourdons ont été utilisés pour la pollinisation.

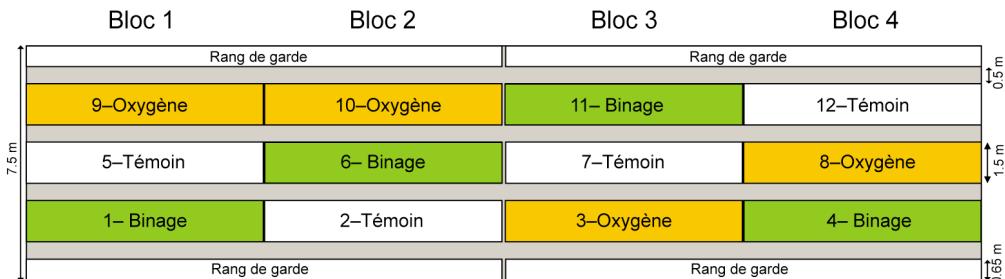


Figure 1. Dispositif de l'étude réalisée en 2008 dans la serre expérimentale des Serres Jardins-Nature. Le traitement d'oxygénéation consistait à enrichir l'eau d'irrigation en oxygène (~20 ppm O₂) à l'aide d'un réservoir d'O₂ pur et d'un injecteur d'air Venturi (Mazzei®) installé au début de la ligne d'irrigation de chaque parcelle traitée.

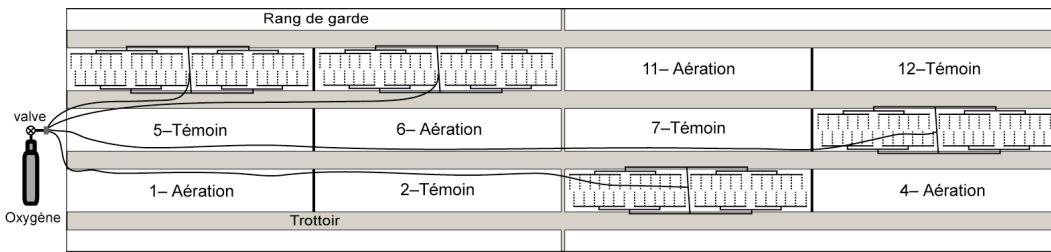


Figure 2. Dispositif de l'étude réalisée en 2009 dans la serre expérimentale des Serres Jardins-Nature. Le traitement d'oxygénéation fut appliqué en injectant de l'O₂ pur directement dans le sol à partir d'un réseau de microgoutteurs à paroi rigide.

Injection d'oxygène dans le sol et aération « mécanique » du sol

Le système d'injection de l'oxygène dans le sol utilisé en 2009 était constitué d'un cylindre d'O₂ pur, d'une valve solénoïde, d'un débitmètre et d'un réseau de microgoutteurs à paroi rigide (Drip Store, Vista, CA, É.-U.) perforés à tous les 15 cm et enfouis sous terre. Des sections de microgoutteurs d'une longueur d'environ 75 cm (~65 cm dans le sol, ~10 cm hors-sol), dont une extrémité a été obstruée à l'aide d'un bouchon, ont été insérées dans des trous faits au préalable à l'aide d'une tige métallique (diam.= 0,95 cm), selon un angle d'environ 25° par rapport à la surface du sol, et distants de 30 cm. Ainsi, une extrémité de microgoutteurs se trouvait près de la surface du sol à 20 cm du trottoir tandis que l'autre se situait à ~25 cm de profondeur sous le bac. Cet espacement de 30 cm a permis d'installer vingt-quatre sections de microgoutteurs de chaque côté des parcelles enrichies en O₂. Les sections de microgoutteurs de part et d'autre du bac ont été installées en quinconce pour éviter tout chevauchement.

Le système de microgoutteurs fut installé de façon à assurer un équilibre pneumatique entre les parcelles. De chaque côté des parcelles soumises à un enrichissement en O₂, quatre groupes de six sections de microgoutteurs ont été constitués en reliant ces sections à l'aide de raccords en T et de tubes non-perforés de 30 cm de long (figure 2). Un raccord en T fut installé au centre de chacun des deux groupes de gauche et ces raccords furent reliés entre eux par un tube non-perforé (1,8 m de long); les deux groupes de droite ont été reliés de la même façon. Ces tubes non-perforés ont ensuite été sectionnés en deux sections de même longueur (0,9 m) et un raccord en T fut utilisé pour les réunir. Puis, le raccord du groupe de gauche et celui du groupe de droite ont été reliés par un tube non-perforé d'une longueur de 3,6 m. Le milieu de ce tube principal fut relié à celui du tube principal provenant de l'autre côté de la parcelle avec un raccord en T. Enfin, ce raccord fut relié à la sortie du cylindre d'oxygène comprimé à l'aide d'un tube non-perforé de 24 mètres de long, peu importe que la parcelle soit située à 5–10 m du cylindre d'O₂.

(par ex. parcelle 3) ou à 25–30 m de celui-ci (par ex. parcelle 8). Des microgoutteurs perforés ont également été installés dans les parcelles témoins afin de vérifier si la présence de microgoutteurs *per se* avait un effet sur la culture. Aucun gaz n'a toutefois été injecté dans les microgoutteurs des parcelles témoins, ces derniers ayant été bouchés à leurs deux extrémités pour éviter de favoriser l'aération du sol des parcelles témoins via ces tubes.

Un débitmètre a été installé à la sortie du cylindre d'oxygène et un débit de huit litres par minute fut utilisé. L'enrichissement en O₂ visait à maintenir une concentration en oxygène dans le sol de 25% en injectant de l'oxygène durant une ou deux minutes, et ce, à toutes les 30 minutes si la concentration moyenne en O₂ dans le sol était inférieure à 25%. Ces fréquences d'injection furent ajustées en fonction de la concentration moyenne en O₂ mesurée à 15–20 cm de profondeur dans le sol des parcelles traitées à l'aide de quatre sondes galvaniques à oxygène (modèle D902, Qubit Systems, Kingston, Ontario). Un étalonnage des sondes à oxygène a été réalisé au début de chaque année de production.

L'aération « mécanique » a été faite à l'aide d'un dard métallique de 20 cm de long et de 0.5 cm de diamètre, installé à l'extrémité d'un manche en bois. Le sol des parcelles soumises au traitement d'aération « mécanique » a été perforé selon un quadrillage dont l'espacement était d'environ 20 cm. L'aération « mécanique » de quatre parcelles a été effectuée à toutes les deux semaines. Un tel traitement a été jugé intéressant par le partenaire puisqu'il peut être mécanisé pour traiter une superficie plus importante.

Apports de fertilisants

Selon les analyses de sol (N, P, K, Mg, Ca, pH, CEC, % m.o.) et le stade de développement des plants de tomate, des amendements ont été apportés directement au sol sous forme de compost et purin, sel d'Epsom et farine de crevettes. Des applications de sel d'Epsom (30 g/litre) et de sulfate de potassium (30 g/litre) ont été effectuées à plusieurs reprises au cours des deux cultures. La régie de fertilisation a été entièrement contrôlée par le partenaire.

Paramètres du sol

Les propriétés chimiques du sol ont été déterminées dans chacune des 12 parcelles en début de culture et à un intervalle de quatre semaines au cours de chacune des saisons de production. Une douzaine de sous-échantillons prélevés aléatoirement avec un carottier à une profondeur de 15 cm et 30 cm ont été réunis pour constituer un échantillon composite par profondeur (0–15 cm; 15–30 cm) par parcelle. Des extractions à l'eau, au KCl et au Mehlich-III ont été réalisées à l'Université Laval sur tous les échantillons de sol (préalablement séchés à 30°C et tamisés à 2 mm). Les filtrats obtenus furent ensuite analysés pour déterminer leurs contenus en macro- et micro-éléments (G. Mercier, laboratoire d'AAC, St-Jean sur Richelieu, QC; A. Brousseau, Université Laval, Québec, QC). À trois reprises au cours de chacune des saisons de croissance, le flux de CO₂ émis par le sol a été mesuré à l'aide d'un système portatif de mesure des échanges gazeux (modèle LI-6400, Li-Cor, Lincoln, NE, É.-U.) et d'une chambre pour le sol. Deux mesures de respiration du sol ont été prises par parcelle en matinée avant la première irrigation de la journée. Au même moment, la teneur en eau volumique du sol a été évaluée par réflectométrie métallique (TDR) à l'aide d'un testeur de câble (modèle 1502C, Tektronix, Richardson, TX, É.-U.) et d'une sonde TDR d'une longueur de 15 cm. Les valeurs de TDR furent converties en teneur en eau volumique selon les équations présentées par Pepin *et al.* (1995).

Mesures agronomiques et qualité des fruits

Des mesures non destructives de la croissance ont été effectuées à toutes les semaines durant la période de production. Trois plants ont été choisis aléatoirement par parcelle et les paramètres de croissance suivants ont été mesurés selon la méthode Tom-Pousse : croissance de la tige, longueur de la 5^e feuille, diamètre de la tige, hauteur de floraison (la dernière grappe), nombre de feuilles, de fleurs et de fruits, ainsi que la vitesse de nouaison. La 5^e feuille de six plants par parcelle fut récoltée une fois par mois (lors de l'échantillonnage du sol) pour évaluer le statut nutritif des plants. Ce feuillage a été séché dans une étuve à 70°C, puis broyée et son contenu en

éléments nutritifs (N, B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P et Zn) a, par la suite, été analysé au laboratoire d'expertise d'AAC St-Jean sur Richelieu.

Le rendement en fruits, la qualité externe des fruits, ainsi que la qualité gustative et nutraceutique des fruits ont été évalués périodiquement au cours de cette étude. Le rendement en fruits a été mesuré trois fois par semaine et la qualité externe des fruits fut évaluée à intervalle de 3 semaines. À chaque récolte, le nombre et le poids totaux des fruits récoltés ont été mesurés pour chacune des unités expérimentales. De plus, douze fruits par unité expérimentale ont été récoltés une fois par mois afin d'évaluer la qualité gustative et nutritive des fruits (analyses effectuées à l'Université Laval au laboratoire de M. Dorais). La conductivité électrique, les acides titrables, les antioxydants totaux solubles, la lycopène, le pH et les sucres solubles ont été mesurés selon les méthodes établies par Bicanic *et al.* (2004) et Clément *et al.* (2008). Pour corrélérer le stade de maturité des fruits aux autres paramètres examinés, la coloration des fruits a été évaluée à l'aide d'un colorimètre (modèle 200, Minolta, Japon) en effectuant des lectures sur les parois latérales du fruit et en ciblant quatre points opposés. Le pourcentage d'eau dans la tomate fut mesuré après avoir déterminé la coloration. Les tomates ont été séchées dans une étuve à 70°C et leur masse sèche a été déterminée pour estimer le contenu en eau.

Échanges gazeux à l'échelle de la feuille

Des mesures de photosynthèse (A), transpiration (E) et conductance stomatique (g_s) ont été effectuées sur la 5^e feuille de deux plants choisis aléatoirement par unité expérimentale, avec un système portatif de mesure des échanges gazeux (modèle LI-6400, Li-Cor). Les conditions environnementales dans la chambre de mesure de la photosynthèse étaient les suivantes : température de l'air entre 22° et 26°C; humidité de l'air entre 45 et 75%; PAR de 1500 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; et concentration de CO₂ dans l'air de 380 ppm. Sous ces conditions, les températures foliaires mesurées furent entre 21°C et 26°C, tandis que le DPV moyen entre la feuille et l'air ambiant était ~1 kPa. Des courbes de réponse de la photosynthèse à la lumière (A vs. PAR) ont d'abord été effectuées en diminuant progressivement l'intensité lumineuse reçue par la feuille de la saturation vers l'obscurité selon la séquence suivante : 2000, 1500, 1000, 750, 550, 450, 350, 250, 150, 100, 50, 20 et 0 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Puis le PAR fut ramené à 1500 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ afin de permettre à la feuille d'atteindre un taux de photosynthèse stable sous des conditions lumineuses saturantes. Des courbes de réponse de la photosynthèse au CO₂ (A vs. C_i) ont ensuite été effectuées en soumettant la feuille aux concentrations de CO₂ suivantes : 400, 260, 220, 180, 140, 100, 60, 400, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, et 900 ppm de CO₂. Différents paramètres photosynthétiques ont pu être obtenus à partir de ces courbes. Toutes ces mesures ont été réalisées à deux reprises (mai-juin et septembre) au cours de chacune des saisons de production.

Analyses statistiques

Les traitements ont été comparés en utilisant une analyse de variance pour un modèle linéaire à effet mixte (procédure MIXED du logiciel SAS v. 8.02; seuil significatif $\alpha \leq 0,05$). L'effet des blocs a été considéré comme un effet aléatoire et l'effet des traitements comme étant un effet fixe. Une analyse de variance à mesures répétées a été effectuée pour certaines variables telle la croissance hebdomadaire de la tige. La normalité de la distribution des résidus des différents modèles linéaires a été évaluée graphiquement et les données furent transformées (i.e. changement de variables) lorsque nécessaire. L'effet de l'oxygénation du sol et de l'aération du sol (par binage ou aération « mécanique ») sur le rendement total (saison de croissance) a aussi été examiné par période de quatre semaines en utilisant les moyennes de rendement hebdomadaires.

Résultats obtenus et discussion

Climat

Les conditions climatiques en serre ont été, dans l'ensemble, relativement similaires entre les saisons de production 2008 et 2009 (figure 3). Les températures de l'air et du sol à 10 cm et 50 cm observées en août et septembre ont été légèrement plus fraîches en 2008 qu'en 2009. La saison de croissance 2008 a également été caractérisée par un rayonnement solaire cumulatif inférieur (~10%) et un taux d'humidité un peu plus élevé que la saison de production 2009.

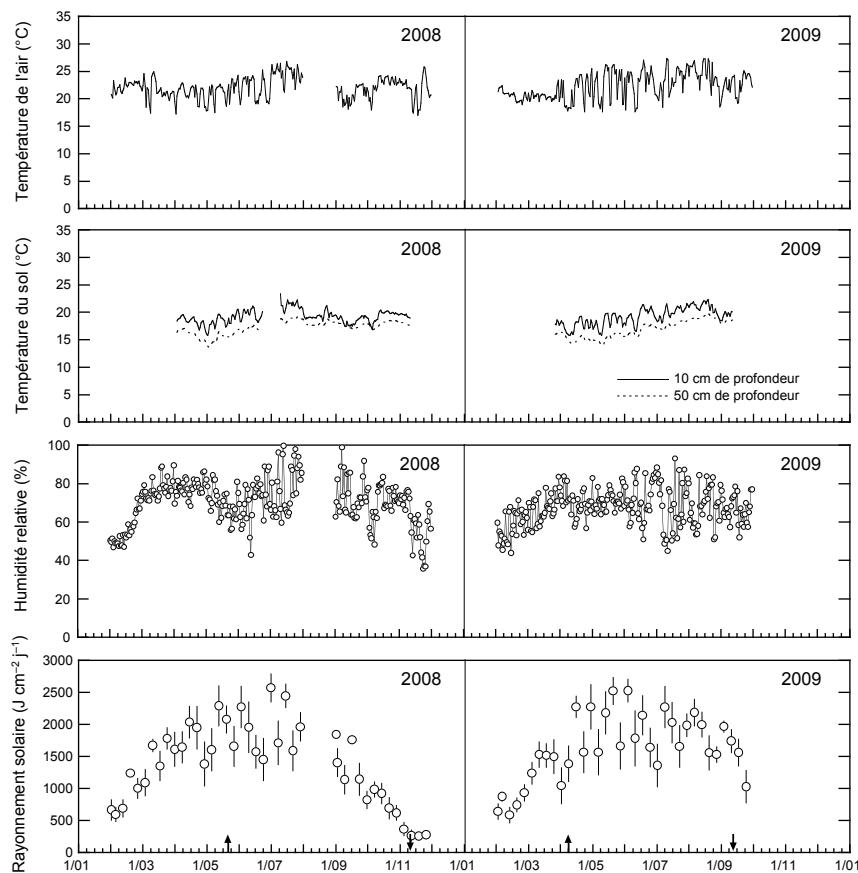


Figure 3. Moyennes journalières (6h–20h) de la température de l'air, de la température du sol à deux profondeurs (10 et 50 cm), et de l'humidité relative observées en serre au cours des saisons de croissance 2008 et 2009. Les moyennes journalières (\pm erreur-type) de rayonnement solaire sont présentées sur une base hebdomadaire. Les flèches indiquent le début et la fin de la prise de données de croissance et de rendement en 2008 et 2009.

Potentiel matriciel du sol

Nous avons établi en 2007 une zone optimale de confort hydrique des plants pour le sol des Serres Jardins-Nature à partir de mesures de plusieurs paramètres physiologiques de la plante et de l'activité biologique du sol (CORPAQ, 2005–2008). Ainsi, pour ce type de sol, un seuil d'irrigation de -100 mbars a favorisé la croissance des plantes par rapport à -40 mbars, tout en réduisant de 46% le volume d'eau utilisé pour irriguer la culture. Cet effet positif ne s'est toutefois pas maintenu au niveau du rendement et de la qualité des fruits. Un seuil d'irrigation de -60 mbars fut donc proposé en 2008 pour permettre à la fois un bon confort hydrique, une meilleure diffusion des gaz et une activité biologique du sol accrue. La moyenne des potentiels matriciels (-52 ± 38 mbars) mesurés à 15 cm de profondeur dans le sol en 2008 a été maintenue près du seuil d'irrigation fixé (Tableau 1). Les tensions matricielles ont cependant varié entre les parcelles, indiquant une certaine hétérogénéité spatiale au niveau de l'irrigation et des

propriétés du sol. Une régie d'irrigation plus humide fut utilisée lors de la saison de croissance 2009 afin que le partenaire puisse uniformiser sa régie d'irrigation pour l'ensemble du complexe de serres (potentiel matriciel du sol ciblé ≈ -20 mbars). La moyenne des potentiels matriciels (-27 ± 10 mbars) mesurés à 15 cm de profondeur dans le sol en 2009 a également été maintenue près du seuil d'irrigation fixé (Tableau 1).

Oxygénation de l'eau d'irrigation

La concentration en O_2 dissous dans l'eau d'irrigation, mesurée dans le tuyau d'irrigation au milieu de chaque parcelle traitée, se situait en moyenne entre 13,4 et 18,2 mg L⁻¹ (tableau 1), à l'exception du mois de mai où l'enrichissement en O_2 fut accidentellement interrompu par un employé des Serres Jardins-Nature. Ces concentrations sont légèrement plus faibles que la concentration cible (~ 20 mg L⁻¹) parce qu'elles représentent des moyennes mensuelles et que certains jours, aucune irrigation n'était requise (par ex., lorsque le potentiel matriciel du sol n'avait pas atteint le seuil de -60 mbars). Il est à noter que l'été 2008 a été relativement pluvieux et nuageux, limitant ainsi les apports en eau aux plantes (faible rayonnement solaire; figure 3). Les concentrations en oxygène dans l'eau d'irrigation des parcelles enrichies en O_2 ont toutefois été nettement supérieures à celles observées dans l'eau d'irrigation des parcelles témoin et des parcelles avec binage. Les mesures effectuées en mars avec une sonde à oxygène portative ont indiqué une concentration en O_2 dissous d'environ 4 mg L⁻¹ dans l'eau potable utilisée pour irriguer les parcelles témoins et celles avec binage. Ces valeurs sont en accord avec les concentrations mesurées en mai 2008 dans les parcelles enrichies en O_2 alors que le traitement d'oxygénation avait été interrompu par erreur (tableau 1). Les concentrations en O_2 de l'eau potable présentées au tableau 1 semblent toutefois sous-estimées, possiblement en raison d'un mauvais fonctionnement de la sonde galvanique utilisée, bien que cette dernière ait été étalonnée à deux reprises au cours de l'été.

Tableau 1. Concentrations journalières maximales en O_2 dans l'eau d'irrigation (i) des parcelles enrichies en O_2 et (ii) des parcelles témoins et aérées par binage (i.e. eau potable) en 2008 et concentrations journalières moyennes en O_2 à 20 cm dans le sol des parcelles enrichies en 2009.

Variable	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre
2008							
[O_2] eau enrichie (mg L ⁻¹)	18,2 \pm 1,0	6,2 \pm 0,8 [†]	16,7 \pm 0,5	16,8 \pm 0,4	15,5 \pm 0,4	15,4 \pm 0,7	13,4 \pm 0,8
[O_2] eau potable (mg L ⁻¹)	n.d.*	2,0 \pm 0,2	1,5 \pm 0,2	n.d.*	2,4 \pm 0,4	0,6 \pm 0,1	0,5 \pm 0,1
Potentiel matriciel du sol (mbar)	-38 \pm 8	-70 \pm 65	-48 \pm 6	-44 \pm 7	-53 \pm 29	-61 \pm 46	-46 \pm 6
2009							
[O_2] dans le sol (%)	23,9 \pm 0,2	25,7 \pm 0,5	25,5 \pm 0,4	25,4 \pm 0,5	n.d.	n.d.	—
Potentiel matriciel du sol (mbar)	-27 \pm 11	-25 \pm 9	-27 \pm 8	-29 \pm 12	n.d.	n.d.	—

Note : *sonde défectueuse; [†]Oxygénation de l'eau d'irrigation interrompue durant un mois. n.d. : non-disponible. Moyenne \pm erreur-type pour les concentrations en O_2 et \pm écart-type pour les potentiels matriciels.

Enrichissement en oxygène à l'aide de micro-tubes enfouis dans le sol

Les concentrations journalières moyennes en O₂ mesurées dans l'air du sol à une profondeur de 20 cm au milieu de chaque parcelle enrichie en O₂ ont été maintenues entre 23,9 et 25,7 % (tableau 1). Ces concentrations correspondaient adéquatement à la concentration cible désirée (c'est-à-dire ~25%), confirmant ainsi l'efficacité du système d'enrichissement en oxygène développé dans le cadre de cette étude. Le fonctionnement de quelques-unes des sondes galvaniques à O₂ fut intermittent durant les mois d'août et de septembre 2009 (concentrations moyennes non-disponibles). La fréquence d'injection de l'oxygène utilisée durant cette période fut toutefois similaire à celle établie en juillet.

Rendement en fruits

En 2008, le rendement en fruits des parcelles enrichies en O₂ via l'eau d'irrigation fut légèrement inférieur au rendement des parcelles témoins et légèrement supérieur au rendement des parcelles avec binage (tableau 2; figures 4 & 5). Nous n'avons observé aucune différence significative entre les traitements d'oxygénéation, que ce soit au niveau du rendement cumulatif total ($P = 0,365$; tableau 2 et figure 4) ou du rendement total moyen obtenu au cours de périodes de quatre semaines ($P = 0,340$; figure 5). Toutefois en 2009, l'enrichissement en O₂ du sol a permis d'atteindre un rendement total en fruits vendables plus élevé (~2 kg m⁻²) que celui des parcelles aérées et des parcelles témoins, le rendement en fruits de ces deux derniers traitements ayant été similaire (tableau 2 et figure 4). Le rendement total moyen par mois (i.e. compilé par période de quatre semaines) a aussi été systématiquement plus élevé dans les parcelles enrichies en O₂ en 2009, à l'exception de la première et dernière période (figure 5). Ce gain de 2 kg m⁻² dans les parcelles enrichies en O₂ par rapport aux parcelles aérées et témoins n'a cependant pas été statistiquement significatif ($P = 0,107$). L'oxygénéation de l'eau d'irrigation et l'enrichissement en O₂ par injection dans le sol ont légèrement augmenté le calibre des fruits comparativement aux traitements témoin et avec binage/aération en 2008 et en 2009, mais ces différences de calibre ne furent pas significatives entre les traitements ($P > 0,642$; tableau 2).

Tableau 2. Effets des différents traitements d'oxygénéation sur le rendement total et le calibre des fruits produits au cours des saisons de production 2008 et 2009.

Traitements	Rendement total en fruits (kg plant ⁻¹)	Rendement total en fruits (kg m ⁻²)	Calibre des fruits (g)
2008			
Binage	11,4 ± 0,9	27,8 ± 1,7	206,6 ± 7,5
Oxygénéation de l'eau	12,1 ± 1,0	29,8 ± 1,9	211,7 ± 7,4
Témoin	12,0 ± 1,8	30,9 ± 4,1	209,0 ± 13,4
Valeur P	0,7385	0,3648	0,6422
2009			
Aération « mécanique »	10,6 ± 0,8	27,0 ± 2,3	206,9 ± 11,9
Enrichissement en O ₂	11,3 ± 0,7	29,0 ± 1,5	211,9 ± 8,8
Témoin	10,2 ± 0,8	27,0 ± 2,1	209,1 ± 16,5
Valeur P	0,2195	0,1070	0,7713

Note : Moyennes ± écart-types.

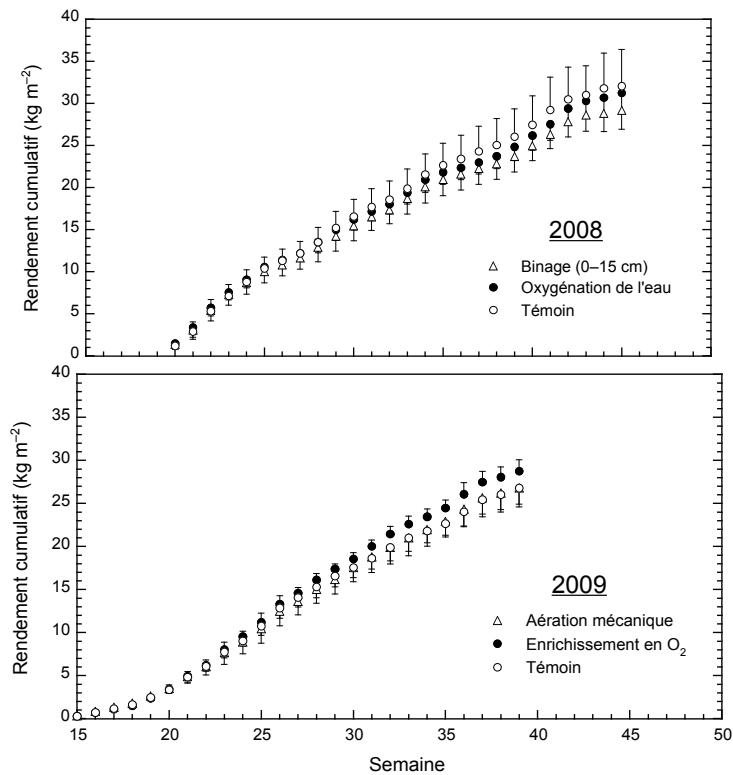


Figure 4. Rendement cumulatif moyen (\pm écart-type) des différents traitements d’oxygénation obtenu au cours de 25 semaines de production en 2008 et en 2009.

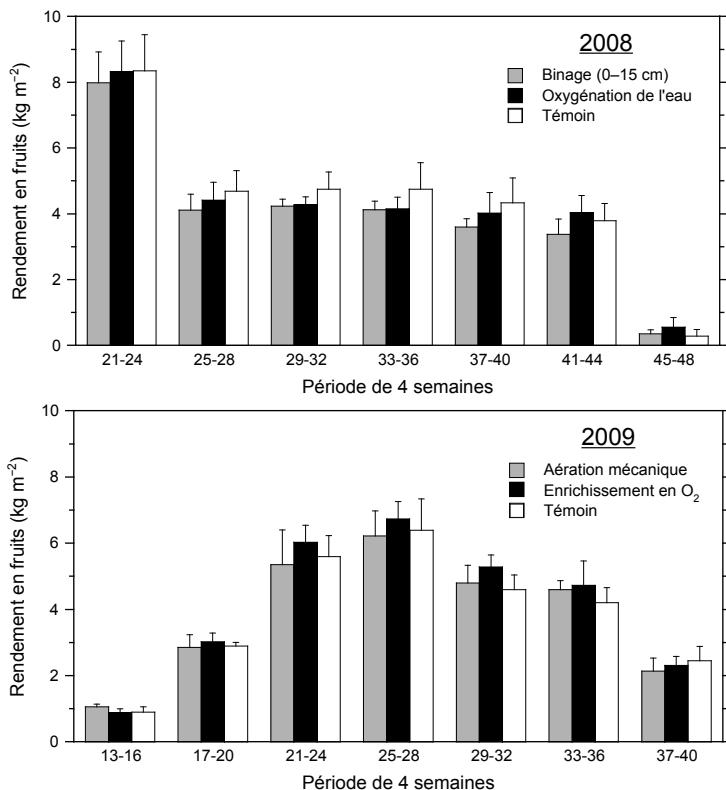


Figure 5. Rendement total en fruits (moyenne \pm écart-type) compilé par période de quatre semaines pour chacun des traitements d’oxygénation.

Courbes de réponses photosynthétiques à la lumière et au CO₂

Les taux de photosynthèse mesurés sous conditions lumineuses saturantes ont été plus élevés en début de saison (mai 2008 et juin 2009) dans les parcelles enrichies en O₂ que dans les parcelles témoins (figure 6). Les plants des parcelles avec binage avaient une photosynthèse intermédiaire en mai 2008 et similaire aux plants des parcelles enrichies en O₂ en juin 2009. Vers la fin de la saison de croissance 2008, les taux de photosynthèse ont été légèrement plus élevés dans les parcelles témoins. Étonnamment, les courbes de réponses photosynthétiques à la lumière ont toutes été similaires en septembre 2009 (figure 6). Aucune différence significative n'a toutefois été observée entre les traitements d'oxygénation pour l'ensemble des paramètres photosynthétiques (c'est-à-dire : photosynthèse nette à saturation lumineuse, rendement quantique, point de compensation à la lumière et respiration foliaire dans l'obscurité) examinés en 2008 et en 2009 ($P > 0,098$).

Les courbes de réponses de la photosynthèse au CO₂ ont également été plus élevées dans les parcelles enrichies en O₂ quelques mois après le début de la production (mai 2008 et juin 2009; figure 7). À l'instar des courbes de réponses à la lumière, les parcelles témoins ont présenté, en septembre 2008, des taux de photosynthèse sous conditions de CO₂ élevées légèrement supérieurs aux autres traitements alors que l'ensemble des courbes de réponses au CO₂ étaient similaires en septembre 2009. Aucune des différences observées entre traitements ne fut toutefois significative ($P \leq 0,05$).

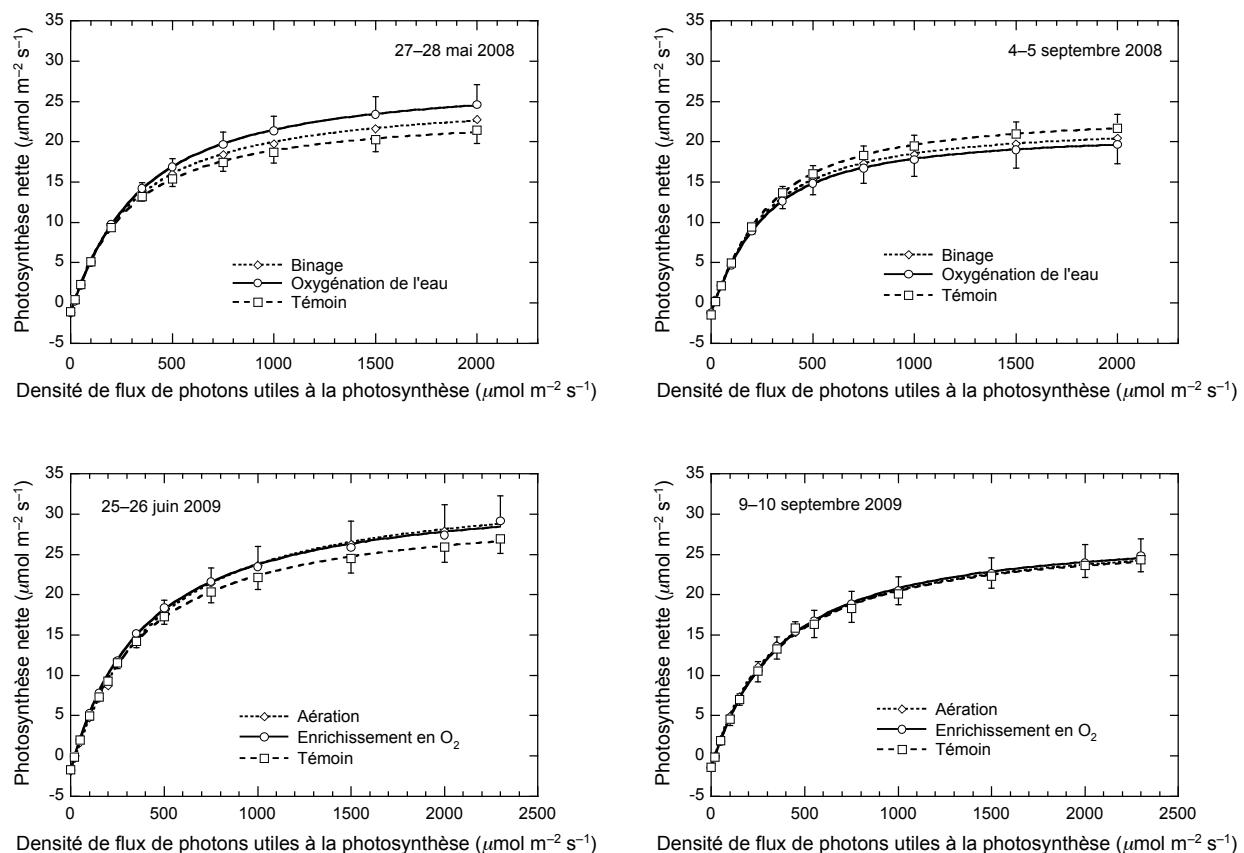


Figure 6. Taux de photosynthèse nette (moyenne \pm écart-type) en fonction de la densité de flux de photons utiles à la photosynthèse (PPFD) pour les traitements : (i) oxygénéation de l'eau d'irrigation, binage et témoin en 2008 ; et (ii) enrichissement en oxygène, aération « mécanique » et témoin en 2009.

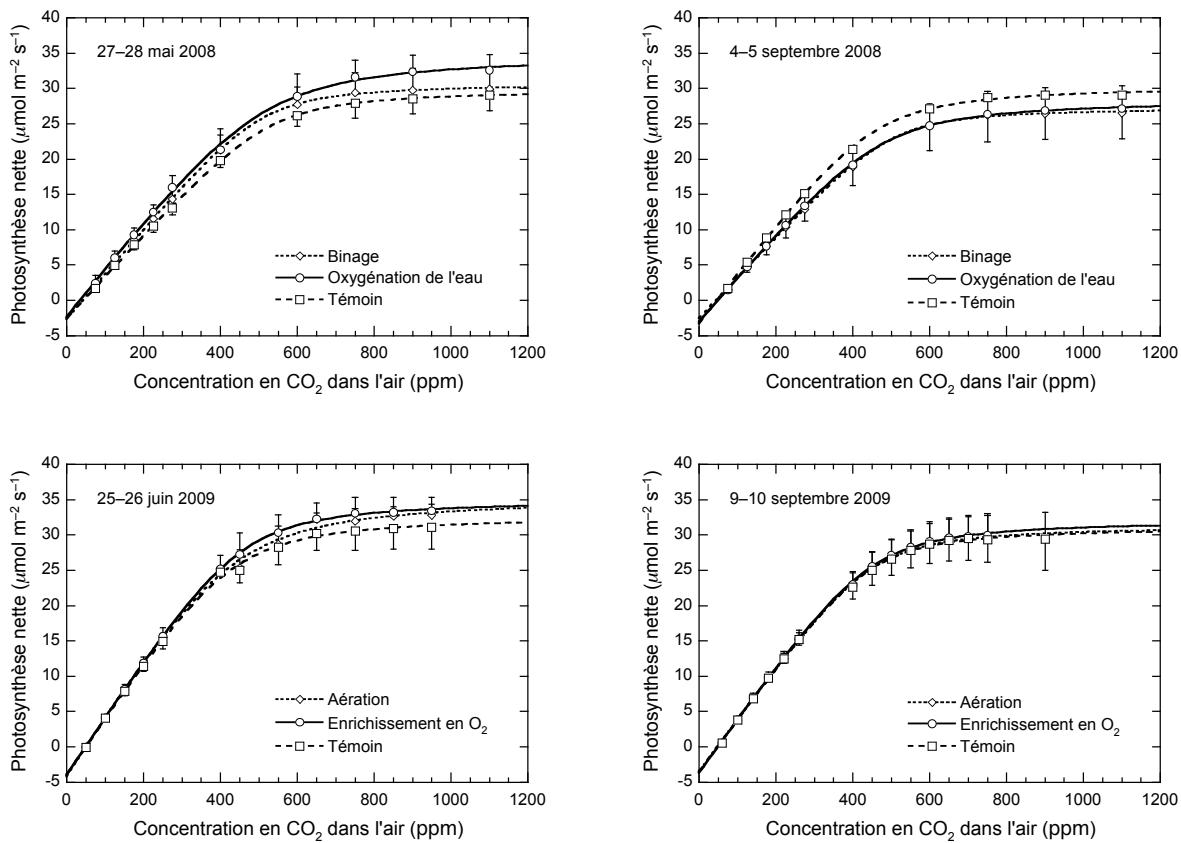


Figure 7. Taux de photosynthèse nette (moyenne \pm écart-type) en fonction de la concentration en CO_2 dans l'air ambiant pour les différents traitements d'oxygénation étudiés en 2008 et 2009.

Croissance

Bien que le nombre de feuilles ait été significativement plus élevé (~1 feuille) dans les parcelles enrichies en O_2 ($P = 0,0026$), ni le binage, ni l'oxygénation de l'eau d'irrigation ne semble avoir eu un effet important sur la croissance des plants en 2008 (tableau 3). La croissance en hauteur de la tige fut légèrement supérieure chez les plants des parcelles avec binage et oxygénation de l'eau d'irrigation. Le nombre de fruits fut aussi légèrement plus élevé alors que le diamètre de la tige et la longueur des feuilles ont été plus faibles que dans les parcelles témoins. Outre le nombre de feuilles, aucune différence significative n'a toutefois été observée entre les traitements d'oxygenation pour l'ensemble des variables de croissance mesurées en 2008 ($P > 0,068$; tableau 3). L'enrichissement en O_2 du sol a également eu un faible effet positif sur les variables de croissance en 2009 (tableau 3). La croissance en hauteur de la tige, le diamètre de la tige, la longueur des feuilles et le nombre de fruits et de feuilles ont été légèrement plus élevés dans les parcelles enrichies en O_2 que dans les parcelles témoins. Ces gains de croissance ne furent cependant pas significatifs ($P > 0,0537$) à l'exception du nombre de fruits ($P = 0,0032$; différence $\sim 0,5$ fruit). En général, les différents traitements d'oxygenation ont peu affecté la croissance des plants de tomate.

Tableau 3. Effets des traitements d'oxygénation sur les variables de croissance des plants au cours de la saison de croissance 2008 et 2009.

Traitement	Croissance de la tige (cm)	Diamètre de la tige (mm)	Longueur de la feuille (cm)	Nombre de feuilles	Nombre de fruits
<u>2008</u>					
Binage	15,5 ± 3,7	8,8 ± 1,1	38,7 ± 3,2	20,4 ± 2,3 b	18,3 ± 3,4
Oxygénéation de l'eau	16,2 ± 3,7	8,9 ± 0,9	39,4 ± 2,6	21,2 ± 2,2 a	17,7 ± 2,6
Témoin	15,2 ± 4,3	9,4 ± 1,3	40,7 ± 4,0	19,9 ± 2,0 b	16,9 ± 2,9
Valeur P					
<i>Traitement</i>	0,5762	0,0677	0,0851	0,0026	0,3839
<i>Semaine</i>	< 0,0001	< 0,0001	0,0248	< 0,0001	< 0,0001
<i>Sem * Trait</i>	0,5204	0,4561	0,9399	0,3401	0,2723
<u>2009</u>					
Aération	18,7 ± 3,0	9,9 ± 1,1	48,7 ± 4,9	23,2 ± 3,8	17,1 ± 5,9 b
Enrichissement en O ₂	19,1 ± 3,1	10,1 ± 1,1	48,5 ± 4,6	23,3 ± 3,6	17,9 ± 6,3 a
Témoin	18,7 ± 3,2	9,9 ± 1,1	47,9 ± 5,0	22,6 ± 3,2	17,3 ± 6,0 b
Valeur P					
<i>Traitement</i>	0,3630	0,1221	0,4212	0,0537	0,0032
<i>Semaine</i>	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
<i>Sem * Trait</i>	0,9026	0,0932	0,7845	0,3563	0,6186

Note : Les variables de croissance sont la moyenne (\pm écart-type) de trois plants par unité expérimentale. Les valeurs représentées par des lettres différentes sont significativement différentes selon le test des moindres différences significatives ($P \leq 0,05$).

Flux de CO₂ à la surface du sol

Des mesures de respiration du sol ont été effectuées à deux emplacements du côté sud de chacune des parcelles traitées (enrichies en O₂, avec binage/aération mécanique) et témoins, et ce, à trois reprises durant les saisons de croissance 2008 et 2009. Cette respiration du sol inclut la contribution respiratoire des microorganismes du sol ainsi que celles des racines des plants de tomate, et constitue par conséquent un bon indicateur de l'activité biologique du sol. Les flux de CO₂ étaient similaires entre les parcelles avant la mise en application des traitements d'oxygénation et de binage en mars 2008 (figure 8). À la fin du mois de mai 2008, les flux de CO₂ étaient plus élevés chez les parcelles avec binage que chez les parcelles témoins et celles enrichies en O₂. En septembre 2008, les traitements d'oxygénation de l'eau d'irrigation et de binage ont doublé la quantité de CO₂ émise à la surface du sol par rapport aux parcelles témoins, sans toutefois présenter de différence entre eux. Selon les résultats de l'analyse de variance avec mesures répétées, l'effet des traitements sur la respiration du sol n'a pas été significatif en 2008 ($P = 0,070$) bien que les flux de CO₂ aient varié de façon significative entre le début et la fin de la saison ($P = 0,0001$). Seule la respiration du sol des parcelles soumises au binage a été significativement plus élevée que la respiration du sol des parcelles témoins ($P = 0,023$). Ces résultats suggèrent donc une meilleure activité biologique du sol lorsque l'aération du sol est améliorée. Toutefois, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements d'oxygénation durant la saison de croissance 2009 ($P = 0,633$). Les flux de CO₂ ont été deux fois plus élevés lors de l'échantillonnage du 11 septembre 2009 que lors des deux dates précédentes (26 mars et 26 juin 2009), ce qui s'est traduit une fois de plus par un effet significatif du temps ($P = 0,0001$). L'apport d'amendements quelques jours avant les mesures de respiration du sol ont pu masquer l'effet bénéfique d'un enrichissement en O₂ dans le sol.

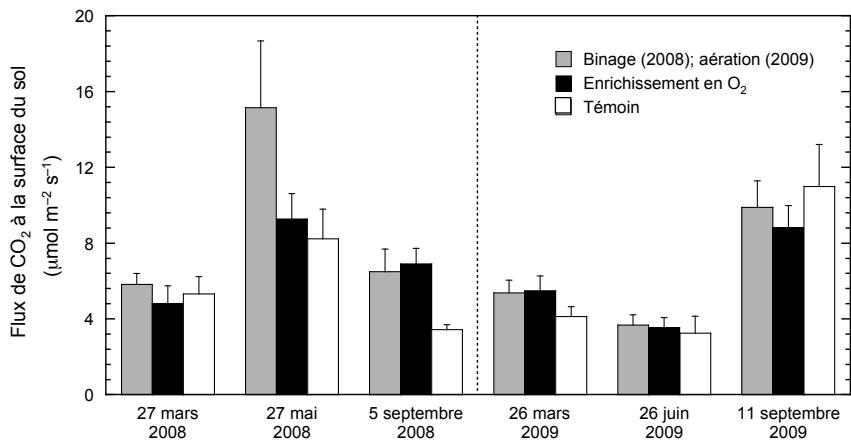


Figure 8. Flux de CO₂ moyen (\pm erreur-type) mesuré à la surface du sol dans chacune des parcelles expérimentales, à trois reprises au cours des saisons de croissance 2008 (oxygénéation de l'eau d'irrigation) et 2009 (enrichissement en O₂ directement dans le sol).

Concentration en éléments nutritifs dans le sol et les feuilles

Les concentrations en ammonium (NH₄) dans l'horizon de sol 0–15 cm ont été significativement plus élevées en 2008 dans les parcelles enrichies en O₂ que dans les parcelles témoins et avec binage ($P = 0,006$; figure 9). Aucune différence significative de concentration en NH₄ n'a cependant été observée entre les traitements d'oxygénéation en 2009 ($P = 0,160$) malgré une concentration en NH₄ plus élevée dans les parcelles traitées lors de la plupart des dates d'échantillonnage. L'ajout d'oxygène dans l'eau d'irrigation (2008) ou directement dans le sol (2009), et les traitements de binage et d'aération ont augmenté de façon significative la concentration en nitrates dans l'horizon 0–15 cm (figure 9). Les concentrations en nitrates ont diminué graduellement au fil de la saison en 2008 et ont été très variables en 2009, notamment en juillet.

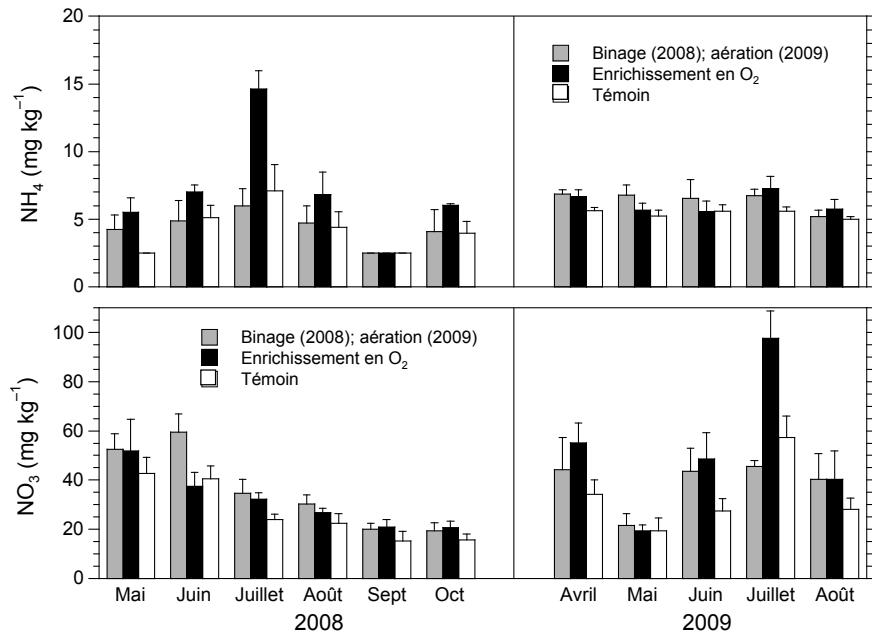


Figure 9. Concentrations moyennes en ammonium et nitrates (\pm écart-type) mesurées dans l'horizon de sol 0–15 cm pour les différents traitements d'oxygénéation étudiés en 2008 et 2009.

Les concentrations en K, P, Mg et Ca ont été considérablement plus élevées dans l'horizon en surface (0–15 cm) qu'en profondeur (15–30 cm), notamment en 2009 (figure 10). L'enrichissement en O₂ du sol a eu un effet significatif sur les concentrations en K, P, Mg et Ca (extraits au Mehlich-III) dans l'horizon 0–15 cm des parcelles traitées, et ce durant les deux années de production (figure 10). Les éléments nutritifs disponibles dans la solution d'eau du sol (extraction à l'eau) ont également été retrouvés en plus grande concentration dans les parcelles enrichies en O₂ et les parcelles avec binage et aération, à l'exception du P (figure 10). Les micro-éléments extraits à l'eau ou au Mehlich-III n'ont toutefois présenté aucune différence significative entre les traitements (données non-présentées).

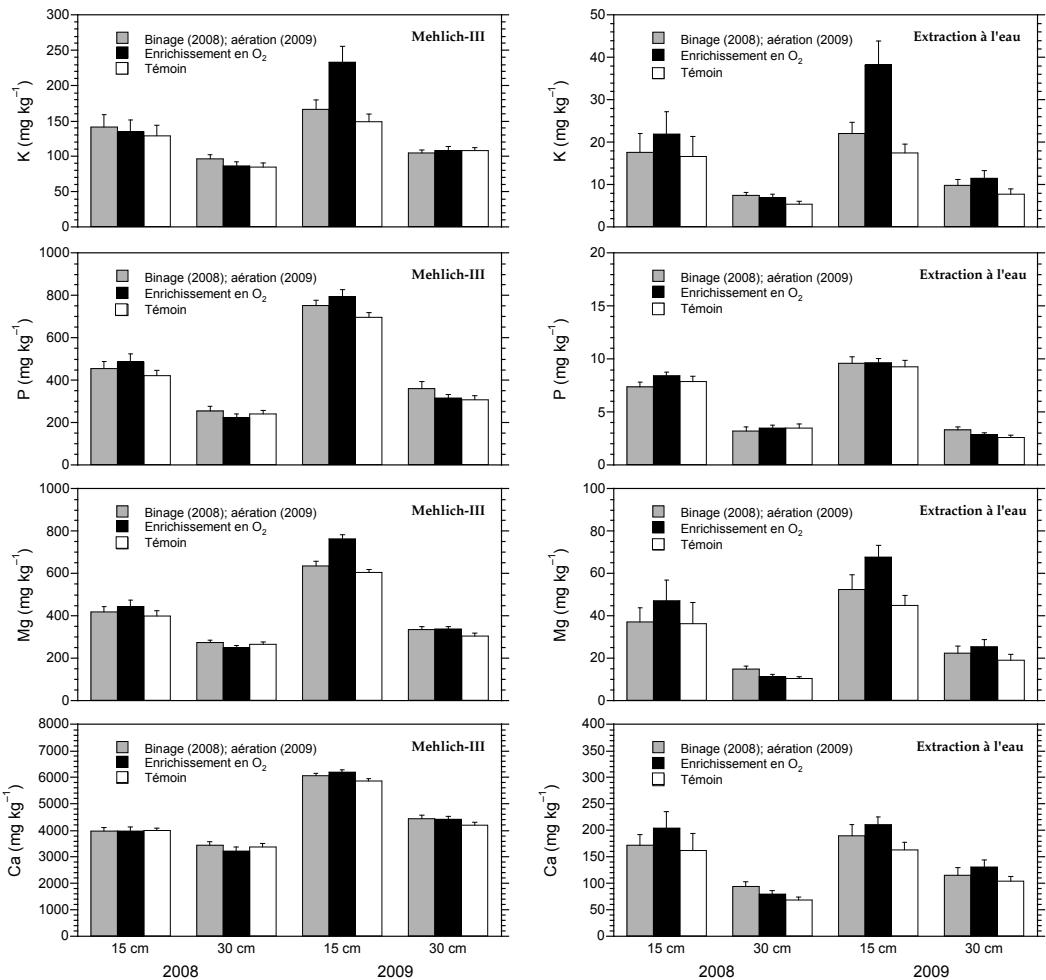


Figure 10. Concentrations moyennes (\pm erreur-type) en K, P, Mg and Ca (extraits à l'eau et au Mehlich-III) mesurées dans les horizons de sol 0–15 cm et 15–30 cm pour les différents traitements d'oxygénéation étudiés en 2008 et en 2009

Une plus grande disponibilité des éléments nutritifs dans le sol a contribué à améliorer le bilan nutritif des plants en 2009. Les concentrations en magnésium (Mg) et en fer (Fe, données non-présentées) ont été significativement plus élevées dans les feuilles des plants enrichis en O₂ par rapport aux plants témoins ($P = 0,004$ and $P = 0,027$, respectivement; tableau 4). Toutefois, aucune différence significative de concentration foliaire en N, K, Ca, Mn, Cu et Zn ne fut observée entre les traitements en 2008, à l'exception de la concentration foliaire en P qui fut significativement plus faible dans les plants irrigués avec de l'eau oxygénée que dans les plants témoins ($P = 0,020$). Le contenu des éléments nutritifs dans les fruits n'a pas été mesuré au cours de cette étude.

Tableau 4. Effets des traitements d'oxygénation sur le contenu en éléments nutritifs des feuilles récoltées mensuellement au cours de la saison de production 2008 (mai–octobre) et 2009 (avril–août).

Traitement	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)
2008					
Binage	3,40 ± 0,72	2972 ± 711 b	25033 ± 5734	22320 ± 3795	4394 ± 843
Oxygénéation de l'eau	3,15 ± 0,64	2754 ± 581 c	24221 ± 4557	22633 ± 4017	4024 ± 568
Témoin	3,40 ± 0,66	3418 ± 648 a	24978 ± 5406	22913 ± 4286	3961 ± 561
Valeur P					
<i>Traitement</i>	0,1623	0,0201	0,9019	0,7785	0,2393
<i>Mois</i>	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0009
<i>Mois * Traitement</i>	0,8091	0,6133	0,6713	0,2210	0,8298
2009					
Aération	4,18 ± 0,71	3416 ± 574	37114 ± 7403	21643 ± 2180	4973 ± 822 b
Enrichissement en O ₂	4,15 ± 0,64	3304 ± 387	36810 ± 6976	21973 ± 2419	5258 ± 1092 a
Témoin	3,84 ± 0,70	3387 ± 657	35619 ± 7576	22785 ± 2176	4606 ± 859 b
Valeur P					
<i>Traitement</i>	0,3996	0,9013	0,8799	0,1674	0,0150
<i>Mois</i>	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
<i>Mois * Traitement</i>	0,2478	0,5025	0,9570	0,1302	0,2174

Note : Les contenus foliaires en mg par kg de masse sèche représentent la moyenne (± écart-type) de six plants par unité expérimentale. Les valeurs représentées par des lettres différentes sont significativement différentes selon le test des moindres différences significatives ($P \leq 0,05$).

Qualité organoleptique et nutraceutique des fruits

À notre connaissance, peu de travaux ont étudié l'effet d'un enrichissement en O₂ sur la qualité des fruits. Puisque l'oxygène affecte l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs, son effet sur la maturation inégale, le microfendillement et la pourriture apicale pourrait être important. De plus, puisque le K est le cation principal contrebalançant la charge ionique des acides organiques, celui-ci peut influencer la qualité gustative des fruits. Or, les concentrations foliaires en K ont été supérieures dans les parcelles enrichies en O₂ et les parcelles avec aération comparativement aux parcelles témoins lors de la deuxième saison de production.

En général, les variables de qualité interne des fruits ont été similaires entre les années 2008 et 2009 (figure 11). Le contenu en matière sèche des fruits a diminué de 5% à 4% entre mai et octobre 2008 alors qu'il est resté relativement stable (~4.5%) tout au long de la production de 2009. La concentration en lycopènes des fruits fut deux à trois fois supérieure en 2008 comparativement à 2009 et celle-ci a diminué significativement durant la saison (~50%; figure 11). Aucune différence significative n'a été observée au niveau du pourcentage de matière sèche, de l'acidité titrable, de la capacité antioxydante et de la concentration de lycopènes et de sucres solubles des fruits lors des analyses effectuées en 2008 ($P > 0,195$). Le pourcentage de matière sèche des parcelles avec binage fut toutefois significativement plus élevé que celui des parcelles témoins lors de l'échantillonnage de juin 2008 ($P > 0,022$). À l'instar de la saison 2008, les variables de qualité interne des fruits ont été semblables pour tous les traitements d'oxygénation en 2009 ($P > 0,109$).

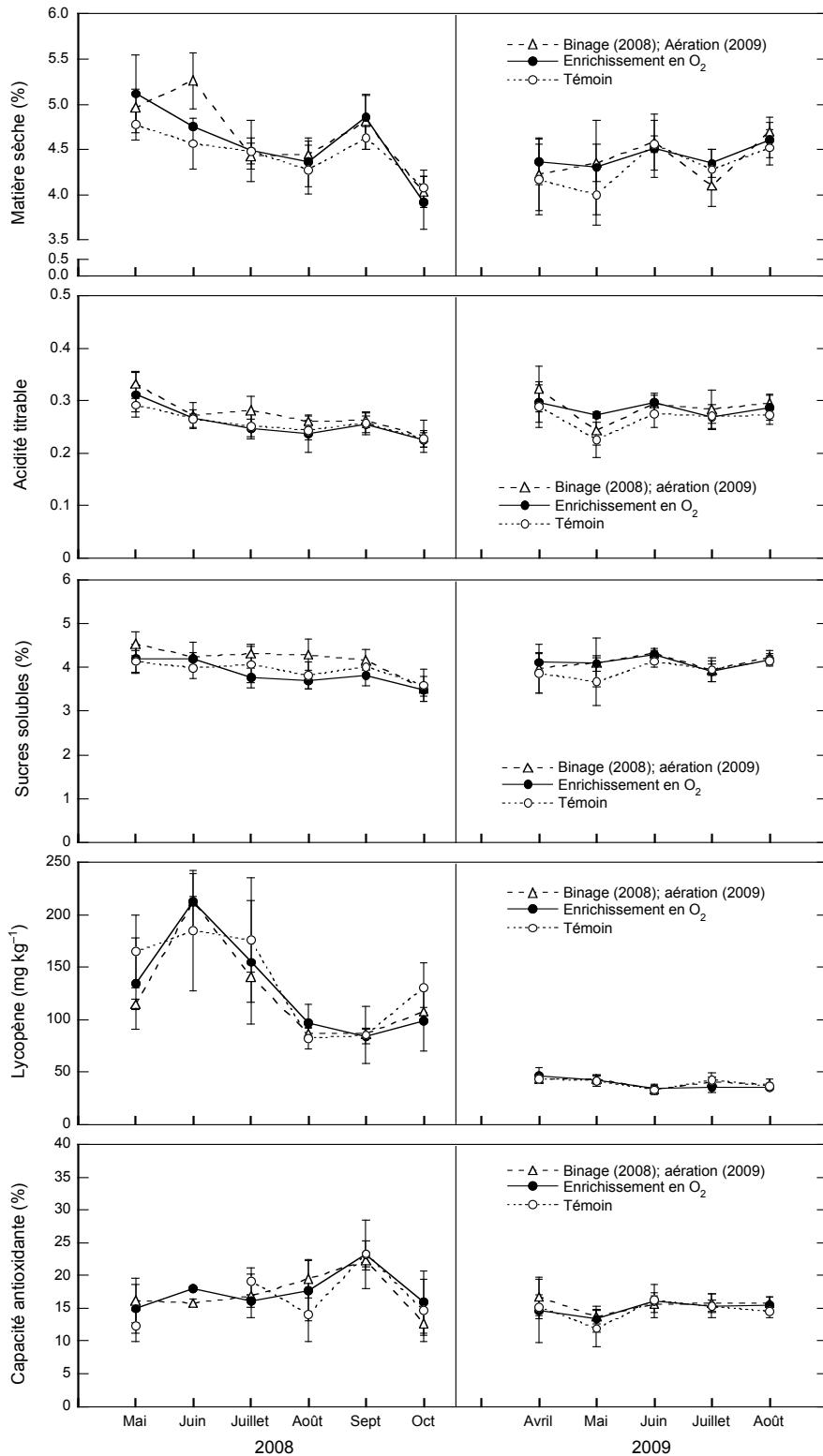


Figure 11. Effets des traitements d'oxygénéation sur le pourcentage de matière sèche, l'acidité titrable et la concentration en sucres solubles, en lycopènes et en antioxydants des fruits produits en 2008 et 2009 (moyennes \pm écart-types).

Discussion et biens livrés

Bien que peu de différences significatives n'aient été observées au seuil de $P \leq 0,05$ pour la croissance et le rendement en fruits, nos travaux ont démontré un effet positif de l'oxygénation sur le rendement total ($\sim 2 \text{ kg m}^{-2}$), le nombre de feuilles et de fruits produits ainsi que sur l'activité du sol. L'analyse du contenu en éléments nutritifs du sol et de la biomasse végétale nous a permis de démontrer l'effet des traitements d'oxygénation sur les taux de minéralisation du sol et l'absorption de ceux-ci par la plante. Il est bien connu que des conditions d'asphyxie de la rhizosphère réduisent l'absorption en eau et en éléments nutritifs par la plante, notamment le K et P, et que la tomate est particulièrement sensible aux conditions anoxiques. De plus, une activité microbienne élevée du sol suite à l'apport de compost et d'engrais organiques peut réduire de façon importante la concentration d' O_2 au niveau de la rhizosphère. D'autre part, une concentration plus élevée en O_2 suite à l'injection d'air dans l'eau d'irrigation a augmenté le taux de photosynthèse de différentes espèces végétales cultivées au champ dans un sol argileux sous les conditions climatiques australiennes (Bhattarai et al., 2004). Lors de cette étude, la capacité photosynthétique des plantes soumises à un enrichissement en O_2 fut aussi supérieure à celle des plantes témoins, notamment en début de saison de croissance. Des facteurs de stress non contrôlés ont pu expliquer l'absence d'effet de l'oxygénation en fin de culture.

Des études antérieures ont également démontré que l'enrichissement en O_2 de la rhizosphère jusqu'à 30 ppm était bénéfique pour la tomate (Zheng et al., 2007). Des augmentations importantes de croissance ont également été observées en hydroponique avec de très faibles augmentations, $\leq 5 \text{ ppm}$ (Chérif et al., 1997). Pour des cultures hors sol de tomate de serre, Papadopoulos et al. (2008) ont reporté des effets positifs de hautes concentrations (sursaturation, 60–75 ppm) en O_2 dans l'eau d'irrigation. Cet effet était plus évident vers la fin de la saison de production et variait selon le milieu de culture et la saison de production. Récemment, Ehret et al. (2010) ont observé un effet positif de l'enrichissement en O_2 de l'eau d'irrigation sur le rendement d'une culture de concombre alors qu'aucun effet n'a pu être observé chez les deux autres cultures de concombre ainsi que chez le poivron. D'autre part, la croissance du concombre a été favorisée lorsque la culture a été intensément irriguée (une minute sur deux) avec une eau enrichie en O_2 . Bien que Marfa et al. (2005) ont observé un rendement plus élevé lorsque le poivron recevait une eau enrichie en O_2 , aucun effet n'a été observé sur le rendement et la qualité du melon (Bonachela et al., 2005) et de la tomate (Bonachela et al., 2010). La difficulté de maintenir une concentration élevée d'oxygène aux goutteurs et dans le milieu de culture explique les résultats contradictoires reportés dans la littérature. Toutefois, l'enrichissement de la rhizosphère en O_2 améliore la durée post-récolte du concombre et du poivron (Ehret et al., 2010).

En résumé, ce projet a permis de :

- 1) Démontrer que l'enrichissement du sol en O_2 à l'aide de micro-tubes perforés permet de maintenir une concentration de 25 ppm dans l'horizon 0-25 cm;
- 2) Démontrer l'effet bénéfique de l'enrichissement en O_2 sur l'activité biologique du sol et la disponibilité des éléments nutritifs pour la plante;
- 3) Démontrer un effet positif de l'enrichissement en O_2 sur la capacité photosynthétique des plantes;
- 4) Démontrer un effet positif de l'enrichissement en O_2 sur certains paramètres de croissance;
- 5) Démontrer un effet positif de l'enrichissement en O_2 sur le rendement.

La variabilité importante entre les parcelles et la puissance limitée de notre dispositif expérimental (4 répétitions) ont limité les effets significatifs au seuil de $P \leq 0,05$. Aucun effet notable de l'enrichissement en O_2 sur la qualité des fruits n'a toutefois pu être observé. Par ailleurs, il serait intéressant et pertinent de poursuivre cette étude afin de vérifier les effets à long terme de l'enrichissement en O_2 sur l'activité du sol et les taux de minéralisation, et par conséquent le rendement et la qualité des fruits.

Une partie de ces travaux a été présentée lors du ISHS/ISO FAR Greenhouse Organic Working group (Cologne, octobre 2009) ainsi qu'à Alnarp (Agricultural Sweden University) en mai 2010. Ces travaux seront présentés lors du 1^{er} ISHS symposium sur les productions biologiques en serre qui aura lieu à Bleswijk en octobre prochain ainsi qu'au Forum de la recherche qui aura lieu au Centre de recherche en horticulture (CRH) de l'Université Laval. Un article scientifique sera également soumis en automne 2010 à Scientia Horticulturea.

Difficultés rencontrées

La fréquence des irrigations observée au cours de la production 2008 n'a pas été suffisante pour permettre au traitement d'oxygénation d'avoir un effet sur la culture. Puisque la radiation solaire et la demande évaporative ont été relativement faibles au printemps et à l'automne, une seule irrigation était requise par jour (parfois même une seule aux deux jours). En période estivale, le nombre d'irrigation (2 à 3 par jour) et le volume d'eau irrigué ont été plus importants mais l'apport d'oxygène dans le sol est demeuré dépendant de la fréquence et de la durée des arrosages. Nous avons remédié à ce problème au cours de la production 2009 en utilisant des micro-goutteurs à paroi rigide enfouis dans le sol pour injecter l'oxygène directement dans l'horizon 0-25 cm. L'enrichissement en oxygène a pu ainsi être effectué plusieurs fois par jour sans nécessiter que l'application de ce traitement d'oxygenation soit tributaire de l'irrigation des parcelles. De plus, le traitement « binage du sol » a été remplacé en 2009 par un traitement visant à améliorer le système poral du sol (et ultimement sa structure). Des trous (diamètre = 5 mm; longueur = 20 cm) ont été faits dans le sol une fois par semaine à l'aide d'un pieu, de façon à imiter les galeries creusées dans le sol par les vers de terre ou par les racines des plantes (par exemple, lors de l'utilisation d'un engrais vert). Ces petits tunnels ont facilité l'aération et le drainage du sol sans perturber de façon majeure la structure du sol comme c'était le cas lors du binage des parcelles. Ce traitement a été jugé intéressant pour notre partenaire puisqu'il peut être facilement mécanisé et appliqué à de grandes superficies de production. L'enrichissement du sol en oxygène a nécessité la manutention d'un nombre considérable de cylindres d'O₂ comprimé durant la saison de croissance 2009. De plus, les coûts d'approvisionnement en oxygène ont été nettement supérieurs aux revenus générés par un gain en fruits de 2 kg m⁻². Il faut cependant souligner que le coût d'achat et de livraison d'un cylindre d'oxygène comprimé était quatre fois plus élevé dans la péninsule gaspésienne comparativement à la région de Québec. Le système d'injection de l'oxygène dans le sol conçu lors de cette étude s'est avéré efficace mais son implantation sur de grandes superficies nécessiterait possiblement une approche différente. Finalement, les sondes galvaniques à oxygène ont présenté quelques problèmes de fonctionnement, ce qui n'a pas facilité l'automatisation des traitements d'oxygenation (en particulier, les boucles de rétroaction). Nous testons présentement des sondes galvaniques à oxygène de la compagnie Apogee dont la fiabilité semble nettement supérieure.