

Table des matières

Résumé.....	iii
Table des matières	iv
Liste des Tableaux	vi
Liste des figures	vii
Liste des abréviations et sigles	viii
Remerciements	ix
Avant-propos.....	x
Introduction	1
Chapitre 1: Revue de littérature	3
<i>Légumes de serre</i>	3
<i>Tomate de serre</i>	3
<i>Concombre de serre</i>	4
<i>Horticulture biologique</i>	4
<i>Nutrition azotée</i>	5
Perspective historique de la fertilisation azotée	7
Aspects environnementaux de la fertilisation azotée.....	8
Aspects liés à la santé humaine de la fertilisation azotée.....	9
<i>Qualité des fruits</i>	9
Composition chimique	10
Paramètres de qualité physique	13
Composés phénoliques.....	13
Acide ascorbique.....	14
Caroténoïdes	14
Solides solubles.....	14
Acidité titrable	15
<i>Influence des conditions climatiques sur la qualité des fruits</i>	15
<i>Influence du mode de culture sur la qualité des fruits</i>	16
<i>Fertilisation en agriculture biologique</i>	17
Besoins en azote de la tomate et du concombre de serre.....	18
<i>Influence de la dose et de la source d'azote sur la qualité des fruits</i>	19
Effets de la dose d'azote	19
Effets de la source d'azote.....	24
<i>Hypothèses et objectifs</i>	28
Chapitre 2: Nitrogen application rate and source effects on growing medium biological properties and fruit quality of organic greenhouse tomato and cucumber	29
<i>Résumé</i>	29

<i>Abstract</i>	30
<i>Introduction</i>	31
<i>Materials and methods</i>	33
Experimental design and greenhouse growing conditions	33
Fertilization treatments	34
Growing medium measurements	36
Plant measurements.....	38
Fruit quality measurements	39
Statistical analysis.....	41
<i>Results</i>	42
Growing medium parameters	42
Growth parameters	55
Yield	58
Fruit quality parameters.....	58
<i>Discussion</i>	60
Effect of N source and organic N application rate on growing medium parameters	60
Effect of inorganic N application rate on growing medium parameters.....	63
Growth, yield and fruit quality parameters.....	63
<i>Conclusion</i>	65
<i>Acknowledgments</i>	66
Bibliographie	69
Annexes	82

Liste des Tableaux

CHAPITRE 1.

Tableau 1. Coût des principaux fertilisants azotés (organiques et inorganiques) utilisés pour la fertilisation en serre.	6
Tableau 2. Valeur nutritive de la tomate et du concombre (sur une base de poids frais)...	12
Tableau 3. Informations complémentaires d'études ayant évalué l'effet de la dose d'azote sur la qualité des fruits.....	22
Tableau 4. Informations complémentaires d'études ayant évalué l'effet de la source d'azote sur la qualité des fruits.....	26

CHAPITRE 2.

Table 1. Growing calendar of the two cultures experimentations.....	33
Table 2. Total fertilizer quantities used during cucumber experiment.....	35
Table 3. Total fertilizer quantities used during tomato experiment.....	36
Table 4. Initial mineral content in the two cultures growing media.....	38
Table 5. Dominant bacterial, fungal and eukaryotic groups expressed by Shannon's index and according to the nitrogen source (for a standard application rate of 100%).....	47
Table 6. Growing medium carbon concentration during the tomato experiment.....	48
Table 7. Nitrogen concentration in tomato tissues and in the growing medium.....	52
Table 8. Nitrogen concentration in cucumber tissues and in the growing medium.....	54
Table 9. Growth parameters of tomato plants.....	56
Table 10. Growth parameters of cucumber plants.....	57
Table 11. Principal quality parameters and yield of tomato plants.....	58
Table 12. Principal quality parameters and yield of cucumber plants.....	59

ANNEXES.

Tableau 1. Moyennes des teneurs en différents métabolites secondaires des fruits de tomate des trois premières grappes récoltées.....	82
Tableau 2. Moyennes des teneurs en différents métabolites secondaires des fruits de concombre durant trois semaines de récolte.....	83
Tableau 3. Contenu en éléments minéraux des feuilles et des fruits de tomate suite à une analyse de variance (ANOVA).....	87

Liste des figures

CHAPITRE 1.

Figure 1. Schématisation du cycle de l'azote, adaptée au contexte de l'étude. 7

CHAPITRE 2.

Figure 1. Growing medium biological parameters according to the nitrogen source and application rate during the tomato greenhouse experiment. Data are means of $n = 6 \pm SE$	43
Figure 2. Total microorganism abundance in the growing medium after a qPCR analysis during the tomato experiment and at 100% application rate. a) Fungi abundance. b) Bacteria abundance. Data are means of $n = 6 \pm SE$	45
Figure 3. PCoA of a) bacteria, b) fungi and c) eucaryota growing medium communities (blue squares = organic; red circles = inorganic; $n = 6$) during the tomato experiment.	46
Figure 4. Relationships between growing medium properties during the tomato experiment (PCA) ($n = 18$).	49
Figure 5. Relationship between soluble organic carbon, CO_2 efflux and microbial activity ($n = 18$).	50
Figure 6. Relationship between soluble nitrate nitrogen concentration and soluble organic carbon content ($n = 18$).	51

ANNEXES.

Figure 1. Relationships between growing medium properties, quality and growth variables during the tomato experiment (PCA) ($n = 18$).	84
Figure 2. Principal bacteria classes (OTUs) abundance in the growing medium of the tomato greenhouse, 38 days after the transplantation.	85
Figure 3. Principal fungi classes abundance (OTUs) in the growing medium of the tomato greenhouse, 38 days after the transplantation.	86

Liste des abréviations et sigles

AT : Acidité titrable
CE : Conductivité électrique
EC : Electrical conductivity
Fv : Variable fluorescence
Fm : Maximum fluorescence
HPS : High pressure sodium
OTU : Operational taxonomic unit
SE : Standard error
SOC : Soluble organic carbon
SON : Soluble organic nitrogen
SSE : Saturated soil extract
SST : Solides solubles totaux

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice, Martine Dorais, pour son soutien tout au long du projet, pour sa passion pour la recherche et le domaine de la production horticole biologique et pour son enthousiasme. Je tiens également à souligner les nombreuses connaissances qu'elle m'a transmises au niveau de la physiologie végétale et son approche très humaine. Je désire remercier Mireille Thériault qui m'a accompagné tout au long du projet, sans qui je n'aurais pu réaliser l'ombre du travail accompli. Je la remercie pour son aide et ses nombreux conseils aux niveaux scientifique, statistique et agronomique.

Merci à Steeve Pépin pour son aide lors des mesures de respiration du sol et sa grande gentillesse. Un grand merci à Réjean Bacon qui m'a introduit à l'univers des analyses de qualité de la tomate et qui m'a donné de bons conseils. Merci à Édith Tousignant pour toute l'aide au laboratoire et pour ces petites capsules humoristiques que nous avons partagées! Merci à Claudine Ménard pour son aide administrative, son écoute et ses bons conseils ainsi qu'à Daniel Sylvain pour les nombreuses connaissances qu'il m'a transmises à propos de la culture en serre. Je tiens également à souligner les bons conseils que m'ont donnés Damien de Halleux et Charles Goulet. Je tiens aussi à remercier Pierre-Paul Dion qui m'a souvent conseillé et avec qui j'ai pu démystifier de nombreux secrets azotés. Merci à Caroline Labbé pour ses conseils et le matériel de laboratoire gentiment laissé à notre disposition et à Jean Martin pour la réalisation des analyses minérales. Je voudrais également souligner le travail du personnel des serres de Nicolas, Rachel et Nicole. Un grand merci à Véronique Richard pour la conduite des analyses phytochimiques à l'INAF; ce fut un plaisir de la côtoyer. Merci à Béatrice Dion, Andréanne Cyr-Wright, Vanessa Audet et Kwami Tchansi pour leur aide indispensable au laboratoire et à la serre, leur présence agréable et réconfortante sans laquelle la longueur de plusieurs heures se serait décuplée. Je remercie évidemment aussi ma famille et mes amis qui ont toujours cru en moi et m'ont aidée à cheminer par leur support.

Je tiens à souligner la précieuse collaboration et l'appui financier de la grappe scientifique biologique II d'Agriculture et Agroalimentaire Canada et des Serres Lefort qui ont permis la réalisation de ce projet de recherche.

Avant-propos

Le mémoire suivant comprend trois sections principales. D'abord, le premier chapitre se consacre à la mise en contexte, l'introduction en matière et la présentation des hypothèses et objectifs de recherche. Une revue de littérature a été effectuée pour décrire les espèces étudiées, approfondir les principaux paramètres de qualité des fruits, leur rôle et les techniques de mesure. Une section de la revue de la littérature traite ensuite des aspects de la culture biologique, de la nutrition azotée ainsi que des liens existant entre les sources et les doses d'azote et les paramètres nutritionnels des fruits. Le deuxième chapitre est rédigé sous forme d'article scientifique en anglais. Cet article traite des effets de la source et de la dose d'azote sur la qualité nutritionnelle et l'activité biologique du milieu de culture des cultures de tomate et de concombre en serre. Le troisième et dernier chapitre fait l'objet d'une conclusion générale et des perspectives d'avenir reliées à cette étude. L'article du second chapitre intitulé « Nitrogen application rate and source effects on growing medium biological properties and fruit quality for two greenhouse organic vegetable crops » sera soumis à la revue scientifique « *Scientia Horticulturae* » à l'automne 2018. J'en suis l'auteure principale, l'ayant rédigé et ayant réalisé toutes les manipulations associées aux expériences qui ont été conduites sous la supervision de ma directrice Martine Dorais ainsi que de l'appui de Mireille Thériault. Ces dernières sont coauteures de l'article qui sera soumis à une revue scientifique.

Introduction

Étant donné les répercussions environnementales du rejet d'éléments nutritifs issus de l'agriculture dans l'environnement, une bonne gestion de la fertilisation est essentielle dans le cadre de l'augmentation de la durabilité des systèmes de production agricole. C'est pourquoi on assiste à une valorisation de l'agriculture biologique, basée sur des apports en éléments nutritifs sous forme organique et visant l'atteinte de l'équilibre entre les agroécosystèmes. Les systèmes de production biologiques peuvent également contribuer à maintenir la rentabilité des entreprises québécoises qui sont orientées vers une production de haute qualité afin de demeurer compétitives au cœur d'un marché concurrentiel et international. En plus d'accorder plus d'importance aux impacts environnementaux de la production agricole, les consommateurs cherchent davantage à intégrer à leur diète des aliments de qualité et exempts de pesticides (Reeve et al., 2017). La production d'aliments à teneur élevée en phytonutriments représente donc un enjeu majeur pour la santé publique. En effet, la tomate est un aliment riche en composés bénéfiques pour la santé humaine tels que les caroténoïdes, les composés phénoliques et les vitamines C et E (Frusciante et al., 2007). Le concombre contient également des composés bioactifs majoritairement localisés dans la pelure et est reconnu pour son goût rafraîchissant. De plus, ces deux cultures sont parmi les plus importantes de l'industrie horticole québécoise.

Plusieurs études, dont des méta-analyses, ont analysé les différences entre des cultures conventionnelles et biologiques au niveau de la qualité des fruits produits, mais leurs conclusions ne présentent pas de consensus (Lairon, 2010; Rembiałkowska, 2007, Smith-Spangler et al., 2012). Cela pourrait entre autres s'expliquer par les nombreux aspects qui diffèrent entre ces deux modes de culture dont le milieu de culture, la gestion du climat, le choix des porte-greffes et des variétés, les pratiques culturales et le contrôle des maladies et des ravageurs. Plusieurs pratiques culturales permettent d'améliorer la qualité des cultures légumières sous abris telles que la régulation d'irrigation et de fertilisation (Pascale et al., 2016) et l'application de certains stress abiotiques tels qu'un stress hydrique, salin ou thermique (Poiroux-Gonord et al., 2010; Ripoll et al., 2014). Ultimement, la principale différence entre les modes de production horticole biologique et conventionnel réside dans les méthodes de fertilisation (Worthington, 2001). En effet, l'utilisation de pesticides synthétiques est relativement limitée suite à l'utilisation d'agents de contrôle biologique et

le faible nombre de pesticides homologués au Canada. De plus aucun herbicide n'est requis pour les cultures en serre. La fertilisation organique azotée est donc au cœur de la culture en serre biologique. Toutefois, la disponibilité de l'azote y est plus variable étant donné que la minéralisation de l'azote organique est un processus lent et dépendant de l'activité biologique du milieu de culture alors qu'en agriculture conventionnelle, l'azote est directement accessible à la plante sous forme de nitrate et/ou d'ammonium. L'azote étant essentiel pour les plantes, il est l'un des éléments clés dans un plan de fertilisation. Il est également l'élément dont les sources diffèrent le plus entre une régie biologique et conventionnelle.

De plus amples recherches sont nécessaires afin de mieux comprendre les effets de la fertilisation biologique des légumes de serre sur l'activité biologique du milieu de culture et sur la synthèse des métabolites secondaires dans les fruits. La présente étude vise à se distinguer de plusieurs autres travaux réalisés précédemment (Hernández et al., 2014; Montagu and Goh, 1990), en calculant l'apport d'azote en fonction d'un même approvisionnement en « azote disponible » plutôt qu'en fonction d'une même quantité « d'azote total » pour chaque traitement. Ainsi, il est possible de se rapprocher des pratiques commerciales et où les rendements sont similaires entre les modes de culture biologique et conventionnel. L'utilisation d'un substrat organique pour tous les traitements permet également d'isoler l'effet de la source d'azote sur les paramètres étudiés. En effet, les sources d'azote sont souvent comparées dans des substrats de culture ou dans des sols différents. Cette étude avait donc pour but de caractériser l'effet de la fertilisation azotée (source et dose) sur l'activité biologique du milieu de culture, la croissance, la performance agronomique ainsi que la qualité nutritionnelle des fruits cultivés sous serre en production maraîchère biologique, et ce, pour deux cultures, soit la tomate et le concombre.

Chapitre 1: Revue de littérature

Légumes de serre

Au Canada, les principaux légumes produits en serre sont la tomate, le concombre, la laitue et le poivron. Le Québec se place au troisième rang en termes de production de légumes de serre, précédé par les provinces de l'Ontario et de la Colombie-Britannique. En 2014, la production québécoise de légumes de serre se chiffrait à 86 678 000 \$, comparativement à 803 226 000 \$ pour l'Ontario, 290 743 000 \$ pour la Colombie-Britannique et à 52 114 000 \$ pour l'Alberta (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2016). L'Ontario comprend 69 % de la superficie cultivée en légumes de serre (s'élevant à 14 393 898 m²), suivi par la Colombie-Britannique (20 %) et par le Québec (7 %) (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2016).

Tomate de serre

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est un fruit de la famille des Solanacées originaire de l'Amérique du Sud. Autrefois cultivée par les Aztèques dans les Andes, elle est par la suite implantée en Europe au 16^e siècle et ce n'est qu'au 18^e siècle qu'on reconnaît ses nombreuses vertus pour la santé humaine (Morganelli, 2016).

La culture de la tomate occupe une place importante à l'échelle internationale, étant le 2^e « légume » - la tomate étant un fruit - le plus consommé au monde après la pomme de terre. À travers la planète, plus de 170 millions de tonnes de tomates sont produites annuellement (FAO, 2014). Au Canada, en 2015, la production de tomate de serre s'élevait à 266 845 tonnes, représentant une valeur à la ferme de 516 928 000 \$ (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2016). La consommation canadienne de tomate, comme légume frais, se situe à 8,1 kg·personne⁻¹·an⁻¹ (MAPAQ, 2016).

Au Québec, en 2014, la production de tomate de serre s'élevait à 18 032 tonnes, représentant une valeur à la ferme de 53 695 000 \$ (MAPAQ, 2016). La superficie de tomate de serre québécoise se situe à 63 ha, comparativement à celle de l'Ontario qui couvre 364 ha (MAPAQ, 2016). Dans cette dernière province, la production de tomates de serre est évaluée à 311 705 000 \$, soit une production de 178 968 tonnes de tomates de serre.

Concombre de serre

Le concombre (*Cucumis sativus* L.), membre de la famille des Cucurbitacées, a été découvert à l'état sauvage à la base de l'Himalaya et cultivé depuis plus de 3000 ans en Inde, pour ensuite être introduit en Amérique par Christophe Colomb (Abu-Reidah et al. 2012; de Candolle, 1883). Mondialement, 74 975 625 tonnes de concombre et cornichons sont produites chaque année (FAO, 2014). Au Canada, 180 194 tonnes de concombre de serre sont produites annuellement, représentant une valeur à la ferme de 308 199 000 \$ (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2016). Les Canadiens consomment en moyenne 3,2 kg-personne⁻¹ de concombre annuellement (MAPAQ, 2016).

Au Québec, le concombre de serre est cultivé sur une surface de 11 hectares et les recettes associées à une production annuelle de 1 649 tonnes s'élèvent à 5 474 000 \$ (MAPAQ, 2016). En Ontario, où se situe la majeure partie de la production canadienne de concombre de serre, ce sont 135 950 tonnes qui sont produites annuellement sur une superficie de 291 ha (MAPAQ, 2016). La production ontarienne se chiffre à 231 166 000 \$ par an (MAPAQ, 2016).

Horticulture biologique

L'agriculture biologique est, selon l'IFOAM (2017), un système qui vise à maintenir la santé des sols, des écosystèmes et des humains. L'horticulture biologique se développe de plus en plus à l'échelle mondiale. En effet, c'est l'un des secteurs alimentaires dont la croissance est la plus rapide, les ventes d'aliments biologiques ayant quadruplé de 1999 à aujourd'hui (Reeve et al., 2017). Plus précisément, la valeur du marché des aliments biologiques a connu une augmentation de 5,8 fois durant les 15 dernières années, atteignant une valeur de 81,6 milliards de dollars américains en 2015, soit une augmentation de 10 % par rapport à 2014 (Willer et Lernoud, 2017).

L'un des aspects définissant l'horticulture biologique est sa fertilisation, étant donné que seuls certains amendements y sont autorisés dans une perspective de maintien de la fertilité et de la santé du sol et de limitation des effets néfastes au point de vue environnemental. En effet, le compost et le fumier, riches en matière organique, y font partie intégrante dans le but de stimuler l'activité biologique des sols: l'activité enzymatique et la biomasse microbienne sont ainsi supérieures dans les systèmes biologiques (Dorais et Schwarz, 2018).

De manière générale, les systèmes biologiques excluent les fertilisants et pesticides synthétiques, les produits issus du génie génétique, les hormones de croissance, les antibiotiques et les boues d'épuration (Dorais et Schwarz, 2018). Au Canada, la production biologique sous serre peut être réalisée en plein sol ou en contenants. Il doit y avoir un délai de 36 mois entre l'utilisation de substances interdites et la récolte de la culture biologique (Gouvernement du Canada, CAN/CGSB-32.310-2015; CAN/CGSB-32.311-2015). Si la production est conduite à l'intérieur de contenants, ceux-ci doivent avoir une hauteur d'au moins 30 cm et contenir un volume de substrat d'au moins 60 L·m², basé sur la surface totale de la serre disponible pour la photosynthèse. Si le volume de substrat est inférieur à 60 L·m², au moins 70 % des besoins en azote et en phosphore doivent être fournis par des amendements solides, requérant une activité biologique du milieu de culture élevée (Gouvernement du Canada, CAN/CGSB-32.310-2015). De plus, le compost doit être intégré dans la régie de fertilisation et son volume doit être supérieur ou égal à 10 % du volume du substrat de culture en début de production (Gouvernement du Canada, 2015). Les semences utilisées doivent être biologiques à moins qu'elles ne puissent être obtenues de façon biologique sur la ferme du propriétaire ou qu'elles ne soient pas disponibles sur le marché. Les systèmes de chauffage et d'éclairage d'appoint ainsi que l'enrichissement carboné sont autorisés (Gouvernement du Canada, 2015).

Nutrition azotée

L'azote est un élément essentiel à la croissance des organismes vivants et est donc indispensable à la production de nourriture à l'échelle planétaire. En effet, il est un élément important entrant dans la composition de la chlorophylle, des protéines (enzymes), des acides nucléiques, des vitamines ainsi que des composés énergétiques tels que l'ATP (Farndon, 1999). L'azote atmosphérique ou diazote (N₂) doit être fixé sous forme assimilable (NH₄⁺, NO₃⁻) afin d'être utilisable par les plantes, celui-ci étant constitué d'une triple liaison le rendant chimiquement très stable. Selon la loi du minimum de Liebig (von Liebig, 1862), l'azote est souvent l'élément qui limite la croissance des cultures. Ainsi, il est un élément clé dans les programmes de fertilisation agricole, puisqu'il permet d'améliorer les rendements. Cependant, il est également l'élément dont le niveau de complexité est le plus important pour la conception des plans de fertilisation (Mortensen, 2000; N'Dayegamiye, 2007) en plus de représenter un coût important comme intrant agricole (tableau 1).

Tableau 1. Coût des principaux fertilisants azotés (organiques et inorganiques) utilisés pour la fertilisation en serre.

Engrais	Farine de sang	Farine de plume	Farine de crevettes	Fumier de poule granulé (Acti-Sol®)	Farine de luzerne	Nitrate d'ammonium	Nitrate de calcium	Urée technique
Formule (N-P-K)	12-0-0	13-0-0	6-4-0	5-3-2	1-2-1	33.5-0-0	15.5-0-0	46-0-0
Calcium (%)	0	0	0	7	0	0	19	0
Magnésium (%)	0	0	0	0.5	0	0	0	0
Source d'azote (O=organique; I=inorganique)	O	O	O	O	O	I	I	I
Prix (\$·kg N ⁻¹)*	19	17	32	24	166	6	6	2

* Coûts provenant de Plant Products® pour des quantités de 20-25 kg et de chez Jardin Jasmin pour l'Acti-Sol.

Afin d'être disponible pour les plantes, l'azote organique contenu dans la matière organique du sol doit d'abord être minéralisé par les microorganismes. La minéralisation de l'azote organique dépend de plusieurs facteurs dont le taux de matière organique (fractions: labile > lentement minéralisable > récalcitrante), la porosité, la texture, le pH, la température et le niveau d'humidité du sol qui influencent tous l'activité des microorganismes (N'Dayegamiye, 2007). En effet, la minéralisation augmente avec la température, l'humidité, la porosité ainsi que la teneur en particules argileuses et limoneuses du sol alors qu'une forte activité microbiologique optimise la disponibilité des formes d'azote assimilables (NO₃, NH₄) (N'Dayegamiye, 2007; Sbih et al., 2003). L'azote est d'abord libéré sous forme d'azote ammoniacal, puis transformé en nitrates (en passant par la forme nitrique) par les bactéries nitrifiantes: ce processus s'appelle la nitrification (figure 1). Cette conversion d'ammonium en nitrates est une réaction acidifiante : $2 \text{NH}_4^+ + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_3^- + 8 \text{H}^+$, des ions hydrogène y étant libérés. Il s'en suit l'assimilation de l'azote par les plantes, sous forme de nitrate ou d'ammonium (figure 1).

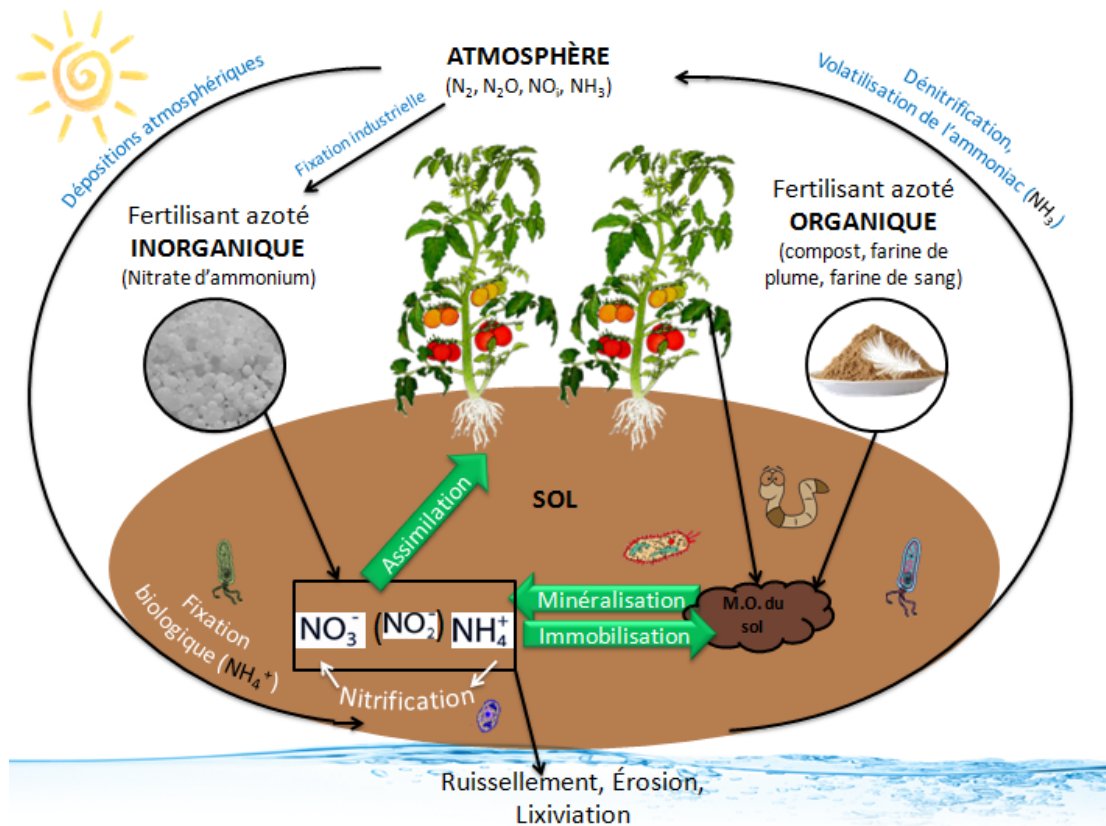


Figure 1. Schématisation du cycle de l'azote, adaptée au contexte de l'étude.

Perspective historique de la fertilisation azotée

Mis au point au début du 20^e siècle et considéré comme l'une des inventions les plus importantes de cette époque, le procédé Haber-Bosch permettait pour la première fois de fixer l'azote de façon industrielle pour ainsi synthétiser l'ammoniac (Hatfield et Follett, 2008). Cette technique fut ensuite largement répandue pour la fabrication de fertilisants azotés qui ont révolutionné l'agriculture à partir du milieu du 20^e siècle (Smil, 2001). Quoique dépendant de l'industrie pétrolière et relâchant d'importantes quantités de CO₂, ce procédé permettait d'obtenir une productivité supérieure et a ainsi mené à une intensification de l'agriculture à l'échelle mondiale. Suite à cette découverte, l'azote organique (principalement le guano) a progressivement été remplacé par l'azote inorganique synthétique et les quantités d'azote utilisées en production agricole n'ont fait qu'augmenter (Hatfield et Prueger, 2004). En effet, la consommation d'azote était située autour de 0 à 5 millions de tonnes métriques en 1960 et celle-ci s'est élevée à plus de 50 millions de tonnes métriques en 2002 (Hatfield et Prueger, 2004).

En 1950, 7 % des apports azotés (totalisant 56 Tg) étaient d'origine synthétique alors que ce chiffre s'élevait à 43 % (des apports totalisant 190 Tg) en 1996 (Mosier, 2001). L'utilisation de fertilisants azotés a donc triplé durant la dernière moitié du 20^e siècle alors que la surface irriguée a doublé, mais que la superficie cultivée n'a augmenté que de 12 %, environ le tiers de la surface terrestre étant consacrée à l'agriculture (Tilman et al., 2001). Cette industrialisation de l'agriculture par cette intensification d'apports en fertilisants a mené au doublement des réserves d'azote naturellement disponible sur la planète via la fixation biologique (Premuzic et al., 1998; Smil, 2001; Vitousek et al., 1997). Aujourd'hui, la demande en fertilisants azotés s'élève à 112 Tg (FAO, 2013). Entraînée par les avancées liées à la synthèse industrielle de fertilisants, l'augmentation de la consommation d'azote est tributaire de l'augmentation de la population mondiale (ayant passé de 3 à 7 milliards d'habitants de 1960 à 2010) et de la modification de la diète de l'humain (Lassaletta et al., 2016). L'alimentation humaine s'est traduite par une élévation de la demande pour la protéine animale, la consommation moyenne de protéines animales et végétales par habitant ayant passé de 3,6 à 4,5 kg N durant les 50 dernières années alors que la proportion de protéines animales a passé de 31 % à 39 % durant les 10 dernières années (Lassaletta et al., 2016).

Sur le tiers de la surface planétaire cultivée, l'utilisation intensive de fertilisants azotés se centralise dans certaines zones: plus de 50 % de l'utilisation des intrants azotés étant concentrée sur seulement 10 % des terres cultivées (Potter et al., 2010). En termes de quantité d'azote appliquée par unité de surface, la Chine, les États-Unis, l'Inde et les pays d'Europe présentent les concentrations les plus élevées (Potter et al., 2010). La direction vers laquelle l'agriculture dite moderne s'est orientée présente toutefois des inconvénients. En effet, l'ajout de grandes quantités d'azote aux cultures entraîne des pertes dans l'environnement ce qui contribue à modifier l'équilibre de l'écosystème agricole.

Aspects environnementaux de la fertilisation azotée

La fertilisation azotée est une source importante de pollution en agriculture conventionnelle et dont les impacts à long terme doivent être approfondis. En effet, l'ajout de grandes quantités d'azote aux cultures entraîne des pertes par le lessivage, le ruissellement et les émissions de gaz à effet de serre (N₂O, CO₂, CH₄), ce qui affecte les cycles biogéochimiques et contribue à modifier l'équilibre de l'écosystème agricole à la fois en affectant la composition de l'atmosphère, des sols et des cours d'eau. Il est estimé

qu'environ la moitié des amendements d'azote se retrouve dans l'environnement plutôt que d'être utilisée par les plantes (Nosengo, 2003).

Lorsqu'ils sont appliqués en surplus, inadéquatement ou sous de conditions non favorables, les nitrates, étant très solubles, peuvent être relâchés dans l'environnement par ruissellement et par lessivage. Ils enrichissent ensuite les cours d'eau où le développement d'algues est favorisé. Cela cause des conditions d'hypoxie qui sont nuisibles à la vie marine, comme c'est le cas dans le golfe du Mexique où le niveau d'oxygène est trop faible pour supporter la vie sur une surface de 20 000 km² (Downing et al., 1999). Les oxydes nitreux (NO_x) relâchés dans l'atmosphère réagissent avec la vapeur d'eau pour former l'acide nitrique qui est responsable de l'acidification des pluies (Hatfield et Follett, 2008). Le caractère acidifiant des engrais azotés lorsqu'ils sont oxydés doit être souligné, puisqu'il modifie les processus biogéochimiques du sol. Ainsi, une bonne gestion des apports azotés est essentielle dans l'optique de développement de systèmes de production plus durables (Baraoui et Grizzetti, 2014; Potter et al., 2010).

Aspects liés à la santé humaine de la fertilisation azotée

La concentration en nitrates naturellement retrouvée dans les eaux souterraines avoisine les 2 mg·L⁻¹ tandis qu'on peut y retrouver 10 mg·L⁻¹ dans les zones agricoles, correspondant au niveau maximal établi par les États-Unis (United States Environmental Protection Agency, 2017). En effet, cette limite a été fixée puisque la consommation d'eau ou d'aliments ayant une forte teneur en nitrates et en nitrites constitue un risque pour la santé humaine (US National Research Council, 1995). Il peut en découler une intoxication qui se nomme la méthémoglobinémie. Quoique peu fréquente chez les adultes (Rembialkowska, 2007), plusieurs cas ont été recensés, principalement chez les enfants et dans les zones rurales (Kross et al., 1992). La méthémoglobinémie, qui peut être fatale, est liée à un mauvais fonctionnement des globules rouges. Ceux-ci ne peuvent plus assurer le transport de l'oxygène, le fer de l'hémoglobine passant de l'état ferreux (réduit) à l'état ferrique (oxydé), suite à l'ingestion d'une quantité élevée de nitrates (plus de 45 ppm de NO₃) qui sont réduits en nitrites (Hatfield et Follett, 2008).

Qualité des fruits

La tomate est un aliment riche en caroténoïdes, en composés phénoliques et en vitamines C et E (Frusciante et al., 2007). Il a été montré que l'intégration régulière d'aliments riches

en polyphénols, caroténoïdes et vitamines à notre diète sont bénéfiques pour la santé (Desjardins, 2016). En effet, ces composés stimulent le développement de notre microflore intestinale en favorisant la croissance de certaines bactéries bénéfiques pour l'humain (Desjardins, 2016). Les tomates sont très riches en caroténoïdes, particulièrement en lycopènes (D'Evoli et al., 2013).

Le concombre est également un aliment recherché dans une saine alimentation puisqu'il constitue un faible apport calorique et qu'il contient beaucoup d'eau (96 %) lui conférant un caractère rafraîchissant (Hedges et Lister, 2005). Sa texture croquante rend cet ingrédient intéressant pour la confection de salades. Il fournit également un certain apport en composés phénoliques, bien que celui-ci soit peu élevé (Hedges et Lister, 2005). Sa pelure contient notamment une protéine (enzyme) nommée la peroxydase (Battistuzzi et al., 2004).

Ainsi les serriculteurs tentent de produire des fruits de qualité, à haute valeur nutritive et riches en molécules bioactives. Une bonne gestion de l'humidité, de la température, de la luminosité et de la concentration en CO₂ de l'air ambiant peut améliorer la qualité de la production (Dannehl et al., 2014).

Composition chimique

La matière sèche est un paramètre important à mesurer puisqu'elle représente la proportion des assimilats photosynthétiques distribuée dans les fruits (Heuvelink et Dorais, 2005). Alors que la tomate est composée de 90 à 95 % d'eau (tableau 2), près de la moitié de la matière sèche de la tomate est constituée de différents sucres (fructose: 25 %, glucose: 22 % et saccharose: 1 %) et 27 % de composés pariétaux comme les protéines, la cellulose, l'hémicellulose et la pectine (Davies et Hobson, 1981). Les fibres totalisent 10 % de la matière sèche (6 % de cellulose et 4 % d'hémicellulose). Les minéraux sont majoritairement le potassium, le phosphore, le calcium, le magnésium et l'azote et représentent 8 % de la matière sèche de la tomate. Quant à l'azote, il représente de 0,16-0,6 % de la matière sèche du fruit pour la tomate (Dorais, 2001). Les acides organiques et aminés (17 %) ainsi que les vitamines, pigments et polyphénols (2 %) complètent sa composition (Davies et Hobson, 1981).

Le concombre montre une composition semblable à celle de la tomate (tableau 2), ayant également un pourcentage de matière sèche situé entre 5-10 % dont la moitié est composée de sucres, principalement le glucose et le fructose (Herraiz et al., 2016). Les principaux minéraux contenus dans le concombre sont le potassium, le chlore, le phosphore, le calcium, le magnésium et le sodium et représentent autour de 5 % de la matière sèche du concombre. Le contenu en protéines et en fibres représente chacun 0,6 % de la masse fraîche du concombre (Hedges et Lister, 2005). Il contient plusieurs vitamines, dont la vitamine C à une teneur d'environ 0,008 % de la masse fraîche (Hedges et Lister, 2005). L'ensoleillement est le facteur qui influence le plus significativement la teneur en matière sèche du concombre et de la tomate de serre (Turcotte, 2008).

Tableau 2. Valeur nutritive de la tomate et du concombre (sur une base de poids frais).

	Tomate	Concombre
Matière sèche (%)	5	4,8
Sucres totaux	25,5	16,7
Fructose (mg·g ⁻¹)	13,1	8,7
Glucose (mg·g ⁻¹)	12,4	7,6
Acidité		
Acidité titrable (% acide citrique)	0,45*	0,08*
pH	4,0-5,1	5,1-5,7
CE (mS·cm ⁻¹)	5,5-5,9	4,5-5,3
Lipides (mg g⁻¹)	1,74	0,74
Protéines (mg·g⁻¹)	7,9	6,5
Pigments et polyphénols		
α-carotène (µg·g ⁻¹)	1,01	0,11
β-carotène (µg·g ⁻¹)	4,5	0,45
Lycopène (µg·g ⁻¹)	25,73	0
<i>Trans</i> -lycopène (µg·g ⁻¹)	0,21-49,58	0
<i>Trans</i> -β-lycopène (µg·g ⁻¹)	0,93-23,32	0
Lutéine et zeaxanthine (µg·g ⁻¹)	1,23	0,23
Flavonols (µg·g ⁻¹)	50	10
Fibre (mg·g⁻¹)	12	7
Vitamines		
Vitamine C (µg·g ⁻¹)	125-189	28
Vitamine A (µg·g ⁻¹)	6,23	0,74
Vitamine E (µg·g ⁻¹)	5,32	0,3
Vitamine B1 - thiamine (µg·g ⁻¹)	0,61	0,27
Vitamine B2 - riboflavine (µg·g ⁻¹)	0,5	0,33
Vitamine B3 - acide pantothénique (µg·g ⁻¹)	6,11	0,84
Minéraux		
K (mg·g ⁻¹)	1,91	1,47
Na (mg·g ⁻¹)	1,15	0,02
Ca (mg·g ⁻¹)	0,33	0,16
Mg (mg·g ⁻¹)	0,1	0,13
Fe (µg·g ⁻¹)	4,44	2,8

Les données proviennent de Davies et Hobson, 1981; Dorais, 2001; la banque de données de l'USDA et de données mesurées dans la présente étude (lorsque marqué d'un astérisque).

Paramètres de qualité physique

La couleur des fruits a un impact déterminant sur le succès de vente, puisqu'elle influence la perception du consommateur à propos de la qualité du produit (Zeithaml, 1988). De plus, pour la tomate, la couleur détermine le stade de maturité du fruit (Camelo and Gómez, 2004). Les tests de colorimétrie sont utilisés pour déterminer la couleur des fruits. Le CIEL*a*b* est un espace colorimétrique qui se définit selon trois valeurs numériques qui, combinées, permettent d'obtenir un indice de couleur. Le L* représente l'éclat du fruit, allant du blanc (0) au noir (100), la lettre a* est une valeur selon une échelle de couleur allant du vert (-300) au rouge (+299) et le b* est une valeur selon une échelle de couleur allant du bleu (-300) au jaune (+299) (Abbott, 1999).

Alors que la masse et le calibre déterminent la catégorie de vente de la tomate, chez le concombre c'est le diamètre et la longueur qui influencent le classement des fruits (Agence canadienne d'inspection des aliments, 2011).

La fermeté est un bon indice de qualité d'un fruit, puisqu'elle influence notamment la durée de conservation du fruit (Hernandez et al., 2014). La valeur de ce paramètre diminue avec la maturation chez la tomate (Jackman et al., 1990). La valeur commerciale du concombre est directement influencée par les paramètres de qualité de couleur et de fermeté (Shimomura et al., 2016). Outre la fermeté, la texture du concombre est aussi définie par le caractère croquant et juteux du concombre. Quoique plus difficilement mesurables, ces aspects influencent grandement l'appréciation du produit par le consommateur (Shimomura et al., 2016). Chez la tomate, les fruits développés dans une atmosphère enrichie en CO₂ montrent une plus grande intensité de la couleur rouge et une plus grande fermeté (Islam et al., 1996).

Composés phénoliques

Les composés phénoliques sont des composés importants influençant le microbiote intestinal (Desjardins, 2016) et principalement situés dans les vacuoles et les parois cellulaires de la tomate (Frusciante et al., 2007). Ces derniers incluent notamment les flavonoïdes et les acides hydroxycinnamiques. La teneur en composés phénoliques se situe autour de 30-70 mg·100 g⁻¹ chez les tomates (Kaur et Kapoor, 2002; Nour et al., 2013).

Le concombre quant à lui a une teneur en polyphénols de l'ordre de 20 mg·100 g⁻¹ (Brennstuhl, 2018). Plus particulièrement, celui-ci comprend plusieurs dizaines de composés phénoliques dont plusieurs sont des formes conjuguées et glycosylées d'acide caféique, d'acide *p*-coumarique et d'acide férulique (Abu-Reidah et al., 2012). Cette étude a révélé la présence de 73 composés phénoliques dans les fruits du concombre, dont 32 composés ayant été répertoriés auparavant dans les tissus végétaux du concombre ou d'autres cucurbitacées (Abu-Reidah et al., 2012).

Acide ascorbique

La vitamine C ou acide ascorbique (forme réduite) est un acide organique recherché dans l'alimentation pour ses effets bénéfiques sur la santé (Combs et al., 2016). La teneur en vitamine C peut varier selon le mode de culture (Auclair et al., 1995; Dorais et Ehret, 2008; Poiroux-Gonord et al., 2010), le niveau de rayonnement solaire (Li et al., 2009; Mexicanus et al., 2006, Venter, 1977) et le cultivar (Dumas et al., 2003), étant généralement plus élevée pour les cultivars de petite taille (Kumar et al., 2007).

Caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments organiques orangés retrouvés dans plusieurs fruits et légumes qui leur confèrent ces couleurs. Ces composés sont assimilables par l'humain et recherchés dans une alimentation de qualité puisqu'ils peuvent contribuer prévenir certaines maladies cardiovasculaires (Koh et al., 2011). Ces pigments naturels sont regroupés dans deux classes soient les carotènes et les xanthophylles.

La tomate est riche en caroténoïdes, particulièrement en lycopènes qui lui confèrent sa couleur rouge et représentent de 60 à 64 % des caroténoïdes totaux (Clinton, 1998), suivi par les β -carotènes et la lutéine (D'Evoli et al., 2013). Le concombre contient quant à lui environ 10 fois moins de caroténoïdes que la tomate, présentant une teneur en α -carotène de 0,11 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ et en β -carotène de 0,45 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (tableau 2). La synthèse des lycopènes est très influencée par la luminosité (Caliman et al., 2010).

Solides solubles

La teneur en solides solubles, représentant environ la moitié de la matière sèche de la tomate et du concombre (Davies et Hobson, 1981), a une importante influence sur la qualité gustative du fruit et donne de l'information quant à la répartition des assimilats photosynthétiques dans le plant. Les solides solubles sont mesurés à l'aide d'un

réfractomètre qui calcule une valeur en degrés Brix (°B) obtenue à partir de l'indice de réfraction (déviations d'un parcours lumineux) de l'échantillon aqueux. La valeur est proportionnelle à la concentration en solutés dans un solvant et fournit donc une bonne estimation du contenu en sucre d'un fruit. Le contenu en sucre s'accroît durant la phase de maturation du fruit (Génard et al., 2010).

Acidité titrable

L'acidité titrable est un paramètre de qualité ayant un effet important sur la saveur du fruit. Elle diminue entre autres avec la maturation du fruit (Anthon et al., 2011). Le ratio « solides solubles totaux : acidité titrable » (SST:AT) est souvent utilisé comme indice de qualité gustative d'un fruit et représente un bon indicateur (Aoun, 2013). Durant le processus de maturation du fruit, le contenu en sucre s'élève alors que l'acidité diminue, ce qui fait augmenter la valeur du ratio. Une valeur se situant autour de 10 est recherchée chez certains groupes de consommateurs pour la tomate (Yara US, 2017). Un ratio plus faible serait à l'origine d'une intensification de l'acidité du fruit, appréciée par les consommateurs européens (Hernandez et al., 2014). Alors que l'acidité titrable de la tomate se situe autour 0,45 %, celle du concombre est environ cinq fois moins élevée, se situant autour de 0,08 % (tableau 2).

Influence des conditions climatiques sur la qualité des fruits

Une gestion adéquate des principaux paramètres climatiques affectant la culture influence positivement la production de fruits de qualité. Les effets de la température, de l'humidité, de la luminosité et de la concentration en CO₂ sur la qualité des fruits produits sont importants (Dannehl et al., 2012; Dorais, 2001; Heuvelink et Dorais, 2005; Leonardi et al., 2000).

Des températures trop élevées (> 30 °C) ou trop basses (< 10 °C) inhibent la maturation du fruit, affectant ainsi la couleur et la formation des caroténoïdes; leur développement optimal étant assuré lorsque la température se situe entre 12-21 °C (Dorais, 2001).

Au niveau de l'humidité, une élévation du DPV (2,2 kPa par rapport à 1,6 kPa) occasionnerait une augmentation des solides solubles, une diminution du poids frais des tomates, une plus grande intensité de la couleur et une réduction du fendillement (Leonardi et al., 2000). La tomate étant constituée à 95 % d'eau, un des principaux effets

d'une faible humidité de l'air est la diminution de la masse des fruits (Heuvelink et Dorais, 2005).

Quoique présentant des résultats inconsistants, la concentration en CO₂ peut influencer la production de composés secondaires. Dannehl et al. (2012) et Wang et al. (2003) ont observé une augmentation des composés phénoliques suite à l'enrichissement en CO₂ auquel ils attribuent une fonction de stress oxydatif alors que Mamatha et al. (2014) dénotent une baisse du contenu en phénols et une augmentation du contenu en vitamine C suite à une élévation du taux de CO₂.

D'autres facteurs comme le cultivar choisi (Aoun, 2013; Dumas et al., 2003; Kumar et al., 2007), l'éclairage artificiel (Olle et Viršilė, 2013; Pepin et Fortier, 2014), le stade de maturité à la récolte (Dumas et al., 2003; Raffo et al., 2002) et les méthodes de conservation post-récolte, la qualité des semences, la densité de plantation (Heuvelink, 1995) et la charge en fruits (Heuvelink, 1997) peuvent moduler la qualité des fruits.

Influence du mode de culture sur la qualité des fruits

Le type de culture, conventionnel, biologique ou hydroponique peut avoir un rôle sur la qualité des fruits produits (Auclair et al., 1995; Dorais et Alsanius, 2015; Dorais et Schwarz, 2018). Quoique certaines études n'observent pas de différence significative concernant la synthèse de métabolites secondaires entre les différents types de production et qu'il n'y a pas de consensus en ce sens dans la littérature (Borguini et da Silva, 2007; Chassy et al., 2006; Lairon, 2010; Rembialkowska, 2007, Smith-Spangler et al., 2012), les tomates cultivées selon un mode biologique pourraient contenir plus de sucres et avoir une acidité titrable plus élevée (Barrett et al., 2007). Au niveau des métabolites secondaires, les tomates biologiques présentent souvent des concentrations plus importantes en caroténoïdes et en phénols (Caris-Veyrat et al., 2004; Hallmann et Rembialkowska, 2007) ainsi qu'en vitamine C (Dorais et Schwarz, 2018; Dumas et al., 2003; Mitchell et al., 2007; Premuzic et al., 1998; Toor et al., 2006; Worthington et al., 2001) que les tomates cultivées selon un mode conventionnel. Certaines études ont montré des résultats similaires dans d'autres cultures, comme une élévation du contenu en composés phénoliques pour le cas de la mûre, de la framboise (Asami et al., 2003) et de la pomme (Weibel et al., 2000) lorsqu'ils sont issus d'une culture biologique comparativement à une culture conventionnelle (Dorais et Ehret, 2008).

Les légumes cultivés en serre ont l'avantage d'être soumis à des conditions climatiques relativement stables comparativement aux cultures en champ ce qui facilite leur étude. Puisque les légumes cultivés en serre sous un climat nordique sont moins affectés par les insectes ravageurs, et étant donné que ceux-ci évoluent dans un milieu fermé, l'utilisation de pesticides y est minime (Jones, 2007). De plus, le contrôle biologique y est relativement efficace puisqu'il s'agit de longues cultures (10-12 mois). La principale distinction entre les modes de culture conventionnel et biologique se trouve ainsi dans la gestion des matières fertilisantes incorporées aux cultures qui influencent directement la fertilité des sols (Worthington, 2001).

Plusieurs études ont tenté d'approfondir les relations complexes existant entre la qualité du sol et celle des fruits (Reeve et al., 2017). Au niveau de l'influence du mode de culture sur la qualité des fruits, il n'existe pas de relation bien établie à ce jour. La culture biologique est parfois associée à une teneur plus élevée en phytonutriments et ceci peut être expliqué par la diminution de la disponibilité des nutriments fournis par les engrais organiques ou l'augmentation du stress (élévation de la pression des pathogènes par l'augmentation du risque d'attaque fongique, parasitique et bactérienne ou par les insectes étant donné l'absence d'utilisation de pesticides de synthèse) des plants issus de ces cultures (Reeve et al., 2017), ces deux facteurs pouvant être liés entre eux (Ochoa-Velasco et al., 2016).

Fertilisation en agriculture biologique

Le concombre et la tomate sont deux légumes, au sens commun (ou fruits, d'un point de vue biologique) largement cultivés et dont les besoins en nutriments sont élevés. La fertilisation biologique est basée sur l'utilisation d'engrais d'origine organique qui subissent la minéralisation, processus par lequel les organismes du sol transforment la matière organique et permettent la libération des minéraux contenus dans cette matière. Dans cette perspective, la fertilisation a pour but d'enrichir et de structurer le sol tout en développant son activité microbiologique pour répondre aux besoins nutritifs de la plante. Son but à long terme est donc de maintenir la fertilité et la santé du sol par des pratiques culturales qui se rapprochent davantage des processus naturels (Diacono et Montemurro, 2010). Étant donné que la gestion de la fertilisation biologique est plus complexe que celle de la fertilisation conventionnelle, il existe une grande variabilité dans les conditions expérimentales retrouvées dans les différentes études s'étant penchées sur le sujet.

Puisque la minéralisation de l'azote apporté aux cultures sous forme organique détermine la disponibilité de l'azote pour la plante et que celle-ci varie en fonction de plusieurs facteurs, la fertilisation organique représente un réel défi en production biologique. En effet, la température, l'aération, le contenu en eau du sol, l'activité microbienne du sol sont des variables qui influencent la minéralisation de l'azote (Cassman et al., 1980, Kätterer, et al., 1998, Tejada et al., 2008) et rendent difficile la réalisation d'un programme de fertilisation bien adapté à l'évolution de la disponibilité des formes d'azote assimilables. C'est pourquoi la majorité des producteurs qui cultivent selon une régie biologique utilisent parfois des quantités d'azote trop élevées par rapport aux prélèvements des cultures et les engrais sont souvent déséquilibrés en termes de besoins de la plante en N-P-K (Voogt et al., 2011). Dans un contexte de production biologique, il demeure donc un réel défi de faire correspondre les apports en fertilisants avec les besoins de la plante et son acquisition des nutriments (Dorais et Alsanius, 2015). De plus, peu d'études portant sur les systèmes biologiques ont isolé l'effet de la forme d'azote de l'effet des propriétés du sol et des conditions de culture (climat, pratiques culturales) sur la qualité des fruits.

Besoins en azote de la tomate et du concombre de serre

Les besoins en azote de la tomate cultivée en serre sont très similaires à ceux du concombre et sont évalués à environ 1100 kg·ha⁻¹, selon les prévisions de rendement (Robitaille, 1995; Voogt et al., 2014). Le prélèvement d'azote annuel peut atteindre 1250 kg·ha⁻¹ pour des cultures longues et productives (Tittarelli et al., 2016). Durant la croissance végétative des plants, les besoins sont moins importants et ceux-ci atteignent 150 kg·ha⁻¹·mois⁻¹ entre la 10^e et la 42^e semaine de production (Voogt et al., 2014). Les besoins varient en fonction de la saison et sont plus élevés en condition de luminosité élevée (été). Les besoins en azote sont également estimés à partir de la production de la biomasse totale, ceux-ci avoisinant généralement 0,3 % N de la production de biomasse fraîche pour les cultures en général (CRAAQ, 2010). Ainsi, une analyse Mehlich-III est généralement réalisée au début de la production de façon à évaluer les réserves d'éléments nutritifs disponibles à moyen terme dans le sol. Durant la production, des analyses de sol sont réalisées régulièrement. Des analyses de type 2:1 (v v⁻¹) ou SSE (extrait de sol saturé à l'eau) sont réalisées de façon hebdomadaire, bimensuelle ou mensuelle dépendamment du contexte, de façon à évaluer les éléments nutritifs disponibles dans la solution du sol (Robitaille et Duval, 2003). C'est également à partir des résultats de ces analyses que la fertilisation est ajustée. Le respect des ratios entre les

éléments nutritifs est très important puisqu'il influence la disponibilité de ces derniers pour la plante (Robitaille et Duval, 2003). Alors que les quantités d'azote incorporées aux cultures en serre sont beaucoup plus élevées que celles préconisées en champ, les ratios entre les éléments y seront également différents (Sonneveld et Voogt, 2009). Les ratios à respecter pour la culture de tomate et de concombre de serre sont de 1 (N), 0,3 (P), 1,4 (K), 0,8, (Ca), 0,3 (Mg) (Brajeul et al., 2005).

Influence de la dose et de la source d'azote sur la qualité des fruits

La fertilisation azotée représente une distinction importante entre les cultures biologiques et conventionnelles. Plusieurs études ont été conduites pour déterminer les impacts de différentes sources et de différentes doses d'azote sur la qualité des fruits, la performance agronomique, la croissance et l'activité biologique du milieu de culture.

Effets de la dose d'azote

Il est bien démontré dans la littérature qu'une augmentation de la dose d'azote améliore les rendements (Spiertz et De Vos, 1983). Cela a, entre autres, été montré pour des solutions nutritives dont la concentration en nitrates variait entre 4 et 12 mmol·L⁻¹ chez la tomate en serre (Benard et al., 2009) et pour des doses allant de 1,5 à 8,2 g N par plant en 23 semaines chez la tomate de serre (Hernández et al., 2014). Cela est le cas jusqu'à un certain degré puisqu'une fertilisation azotée trop importante (de 350 à 600 kg N·ha⁻¹) n'augmente pas les rendements de la tomate (Feijuan et Cheng, 2012) ou les diminue lorsque la concentration en azote dépasse 225 ppm chez le concombre de serre (300 et 375 ppm) (Jasso-Chaverria et al., 2005). Le rendement est également corrélé à la concentration d'azote foliaire (Montagu et Goh, 1990). Un résumé des conditions de culture des études ayant évalué l'effet de la dose d'azote est présenté au tableau 3.






Lorsque les rendements sont diminués, il en résulte souvent une augmentation de la concentration en solides solubles dans les fruits dû à un effet de concentration des assimilats photosynthétiques dans un plus faible volume de fruits (Dumas et al., 1994). Dans le même sens, quant aux métabolites secondaires, une augmentation de la dose d'azote diminue généralement la concentration en vitamine C des fruits (tomate et poivron) (de Oliveira et al., 2015; Dumas et al., 2003; Mazzitelli et al., 2014; Montagu et Goh, 1990; Ochoa-Velasco et al., 2016; Worthington, 2001). Les doses d'azotes étudiées variaient

entre 0 et 645 kg·ha⁻¹ (de Oliveira et al., 2015), entre 160 et 200 kg·ha⁻¹ (Mazzitelli et al., 2014), entre 0 et 600 kg·ha⁻¹ (Montagu et Goh, 1990) et entre 0 et 250 kg·ha⁻¹ (Ochoa-Velasco et al., 2016). Cela peut s'expliquer en partie par l'augmentation de la surface foliaire des plants recevant un apport plus élevé en azote qui diminue la réception de lumière par les fruits induisant ensuite une réduction de la synthèse de vitamine C (Dumas et al., 2003; Premuzic et al., 1998). Également, une diminution des composés phénoliques est observée chez des plants de choux (Hsu et al., 2009) et de tomate (Ochoa-Velasco et al., 2016) non fertilisés comparativement à ceux recevant une fertilisation alors que des tendances non significatives similaires, soit de l'augmentation des composés phénoliques, suite à une augmentation de la dose d'azote de 4 à 12 mmol·L⁻¹ ont également été observées (Bénard et al., 2009). Ces observations s'expliquent par une diminution du stress abiotique lorsque la disponibilité des nutriments augmente (Ochoa-Velasco et al., 2016). Une expérience réalisée dans une serre de poivron conventionnelle a montré qu'une faible dose d'azote utilisée (56 ppm comparativement à 102 et 159 ppm N) présentait des rendements plus élevés ainsi qu'un moindre impact environnemental alors que la dose n'influçait pas la qualité (contenu en β -carotène et en lycopène et activité antioxydante totale) des poivrons (Yasuor et al., 2013). Chez le concombre, une diminution de la fermeté et une augmentation de l'intensité de la couleur verte ont été observées suite à l'élévation de la dose d'azote pour des traitements dont la concentration en azote de la solution variait entre 75 et 375 ppm (Jasso-Chaverria et al., 2005).

Au niveau des paramètres phytochimiques, suite à une augmentation de la dose d'azote de 0 à 645 kg·ha⁻¹ (de Oliveira et al., 2015), de 1,5 à 8,2 g N·plant⁻¹ (Hernández et al., 2014) et de 4,5 à 36 mmol·L⁻¹ (Wang et al., 2007), il a été montré une élévation de l'acidité titrable et des solides solubles alors que Bénard et al. (2009) ont observé une augmentation de l'acidité titrable suite à l'élévation de la dose d'azote (4 à 12 mmol·L⁻¹). Ce serait dû à un effet indirect de l'azote qui, en stimulant la photosynthèse, augmenterait la production de solides solubles (de Oliveira et al., 2015). Cet effet pourrait aussi s'expliquer par la réduction de la pression osmotique de la solution du sol (c.-à-d. plus fortement négative) lorsque celle-ci est plus concentrée en nutriments (accroissement de la conductivité électrique du sol), ce qui induirait une diminution de l'apport en eau vers les fruits et donc une concentration des solutés plus élevée à l'intérieur de ces derniers (de Oliveira et al., 2015). Cependant, un déficit d'azote (2.5 mmol·L⁻¹ par rapport à $\geq 4,5$ mmol·L⁻¹) pourrait stimuler l'accumulation des hydrates de carbone (Wang et al.,

2007). Toutefois, chez la tomate, d'autres études ont observé l'effet inverse: le contenu en solides solubles diminue lorsque la dose d'azote fournie à la plante augmente de 4 à 12 mmol·L⁻¹ (Benard et al., 2009), de 0 à 150 % de la dose recommandée (Jorge et al., 2017) et de 160 à 200 kg N·ha⁻¹ (Mazzitelli et al., 2014).

Tableau 3. Informations complémentaires d'études ayant évalué l'effet de la dose d'azote sur la qualité des fruits.

Référence	Culture	Régie de sol	Doses d'azote	Qualité (effet de l'augmentation de la dose)	Croissance
Benard et al., 2009 	Tomate	Blocs de laine de roche + vermiculite. Solution nutritive	3 doses: 4, 6 et 12 mM NO ₃ ⁻	(+) sucres, (-) acidité	
de Oliveira et al., 2015 	Poivron	Pot 25 L	6 doses: 0-50-100-150-200-300 % de N et K (100 %N=215 kg·ha ⁻¹ ; 100 %K=314 kg·ha ⁻¹)	(+) acidité, mais (-) acidité N trop élevé (-) vitamine C	(+) développement foliaire
Feijuan et al., 2012 	Tomate	Pots 10 kg sol (plants de 40 jours)	3 doses: 100, 350 et 600 kg·ha ⁻¹ (c.-à-d. 0,057, 0,142 et 0,342 g N·kg ⁻¹ sol) sous forme d'urée	(+) sucres, (+) vitamine C (à haute intensité lumineuse)	(+) de rendements à 350 kg·ha ⁻¹ qu'à 100 kg·ha ⁻¹
Jasso-Chaverria et al., 2005 	Concombre	Contenants 3 gal. Perlite. Fertigation	5 doses: 75, 150, 225, 300 et 375 ppm N (CaNO ₃)	(-) fermeté, (+) couleur verte	(+) rendement jusqu'à 225 ppm N (éq. Quadratique). (=) longueur et diamètre. (+) [N] foliaire
Kumar et al., 2007 	Tomate	Pots (11 cm diamètre) 80 % tourbe, 20 % compost jusqu'à la plantation plein sol	2 doses: 0 et 100 kg N·ha ⁻¹ (organique: corne broyée)	(+) de lycopènes, carotènes et lutéine	

Mazzitelli et al.,
2014



Tomate

Plein sol

2 doses: (1) = 160 kg N·ha⁻¹ (compost) et (2) = 200 kg N·ha⁻¹ ((1) + 40 kg N·ha⁻¹ (concentré de fumier liquide))

(-) vitamine C

(+) chlorophylle foliaire.
Pas d'effet sur le rendement

Montagu et
Goh, 1990



Tomate

Pots 4,5 L

4 doses: 0, 150, 300 et 600 kg N·ha⁻¹. 4 sources: 2 organiques (farine de sang et compost); 2 inorganiques (nitrate de potassium et sulfate d'ammonium)

(-) vitamine C

(+) rendement, sauf avec compost. (effet source*dose)

(+) lycopènes sauf avec compost (effet source*dose)

(+) [N] dans les fruits et feuilles sauf avec le compost (effet source*dose)

Ochoa-Velasco et al., 2016



Tomate

Sacs 8 dm³

5 doses: 0, 25, 50, 75, 100 %. Pleine dose = 250 kg N·ha⁻¹ (urée)

(-) activité antioxydante

(-) vitamine C et de phénols

Parisi et al.,
2006



Tomate

Plein sol, loam, 3,36 plants·m²

6 doses: 0, 50, 100, 150, 200 et 250 kg N·ha⁻¹ (NH₄SO₄ et NH₄NO₃)

pas d'effet (sucres, acidité, fermeté, pH)

(+) rendement

Yasuor et al.,
2013



Poivron

Lits de culture, plein sol, 33,3 plants·ha⁻¹

4 doses, fertigation: 9,2, 56,2, 102,3, et 158,5 ppm (fertilisants commerciaux liquides)

pas d'effet (solides solubles, acidité, pH, capacité antioxydante)

(-) rendement et croissance. Rendement et croissance maximaux à 56 ppm. Prélèvement d'N maximal par la plante à 102,3 ppm

Cela peut être dû à la diminution de la température des fruits suite à l'augmentation de la surface foliaire (et donc l'augmentation de l'ombrage) chez les plants recevant un apport azoté plus élevé (Benard et al., 2009). Cela pourrait aussi être attribuable à l'effet de dilution occasionné par l'augmentation des rendements (Dumas et al., 1994). L'hypothèse de l'équilibre carbone:nutriments stipule qu'en présence de concentrations en azotes plus élevées, les plantes produisent davantage de composés à base d'azote et moins de composés à base de carbone (Bryant et al., 1983). En effet, il est suggéré que lorsque la dose de fertilisants s'élève, l'investissement de la plante pour la croissance augmente et la production de composés non azotés tels que les solides solubles est réduite (Stamp, 2003). Finalement, plusieurs études n'observent pas de relation entre le contenu en solides solubles et l'apport en azote (Mazzitelli et al., 2014; Ochoa-Velasco et al., 2016; Parisi et al., 2006; Porto et al., 2016; Rebouças et al., 2015; Toor et al., 2006).

Effets de la source d'azote




Une plus faible disponibilité de l'azote sous forme minérale est fréquemment observée en culture biologique étant donné que l'azote y est incorporé sous forme organique. Ces formes d'azote doivent être minéralisées préalablement à leur prélèvement par la plante ce qui induit une plus grande variabilité de leur disponibilité. Considérant que les légumes de serre produisent dix fois plus que ceux qui sont cultivés en plein champ, leurs besoins en azote sont très élevés. Les besoins de la tomate (étant semblables à ceux du concombre) en serre se situent à $1100 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Voogt et al., 2014) alors que les besoins en champ se situent à $135 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ (CRAAQ, 2010). Ainsi, une diminution des rendements est souvent remarquée suite à un programme de fertilisation azotée organique chez la tomate comme chez le concombre (Dumas et al., 2003; Santiago-López et al., 2016). Cette disponibilité de l'azote réduite lors de la fertilisation organique peut entraîner une diminution de la croissance végétative et donc une réduction de la surface foliaire. Cela peut se traduire par l'augmentation du contenu en vitamine C des cultures fertilisées de façon organique, les fruits étant davantage exposés à la lumière (Dumas et al., 2003).

Également, une augmentation de la teneur en composés phénoliques est généralement associée aux cultures issues d'une fertilisation azotée organique (Hsu et al., 2009; Mitchell et al., 2007; Toor et al., 2006; Weibel et al., 2000). L'augmentation de la teneur en composés phénoliques peut s'expliquer selon l'hypothèse de l'équilibre des nutriments

carbonés (carbon nutrient balance) (Bryant et al., 1983) selon laquelle les plants cultivés sous des conditions où les nutriments sont limités tendraient à augmenter leur production de métabolites secondaires carbonés (Hsu et al., 2009). Cette hypothèse va dans le même sens que l'explication mentionnée précédemment selon laquelle le stress abiotique augmente lorsque les nutriments sont limités, favorisant la production de composés phénoliques (Ochoa-Velasco et al., 2016).

Un effet synergique de la fertilisation combinant une source d'azote organique (10,2 g N plant^{-1} provenant de compost durant la période de culture de 23 semaines) et inorganique (5,0 g N $\cdot\text{plant}^{-1}$ durant la période de culture de 23 semaines) provenant de la solution Hoagland) a été observé lors d'une étude réalisée en Espagne sur la tomate (Hernández et al., 2014). Les traitements provenant d'une fertilisation combinée présentaient les rendements, le taux en solides solubles, l'acidité titrable, le ratio SS/AT et la biomasse microbienne les plus élevés par rapport aux autres sources utilisées seules. Des études réalisées chez le concombre ont aussi montré les effets positifs sur les rendements et la croissance d'une fertilisation combinée. Dans une de celles-ci, le compost était combiné au nitrate d'ammonium, et la combinaison 75:25 (N inorganique : N organique) présentait les rendements les plus élevés (Mahmoud et al., 2009) tandis que dans une autre étude, le fumier (10 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) était combiné à un engrais inorganique standard (400 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) (Eifediyi et al., 2010). Toutefois, dans la seconde étude, l'effet positif semble être lié à la dose d'azote plutôt qu'à la source, car les plus hauts rendements étaient observés avec la combinaison des plus hautes doses d'azote organique (10 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) et inorganique (400 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Il demeure que certaines études n'ont pas observé de différence au niveau des rendements (Mazzitelli et al., 2014; Toor et al., 2006) ou encore des solides solubles des fruits (del Amor, 2007; Toor et al., 2006) en fonction de la source de fertilisant azoté. Les informations relatives à la régie de sol et aux traitements précis effectués dans les études mentionnées sont résumées au tableau 4. Il existe aussi des effets de la source d'azote inorganique; la biomasse (foliaire et racinaire) étant plus élevée et le contenu en sucres plus faible suite à une fertilisation azotée en nitrate (NaNO_3) comparativement à une fertilisation en azote sous forme d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) pour une culture de tomate (Harada et al., 1968). La croissance était également plus élevée suite à l'utilisation d'une solution nutritive où la source d'azote dominante était les nitrates (solution de Hoagland) comparativement à une solution où l'ammonium (urée et nitrate d'ammonium) dominait, pour une culture de concombre hydroponique (Heuer, 1991).

Tableau 4. Informations complémentaires d'études ayant évalué l'effet de la source d'azote sur la qualité des fruits.

Référence	Culture	Régie de sol	Doses d'azote	Qualité Effet de l'N organique par rapport à l'N inorganique	Croissance
Eifediyi et al., 2010 	Concombre	Plein sol, zone transitoire savane-forêt	15 traitements: 3 organiques (0, 5 et 10 t N·ha ⁻¹ de fumier) et 5 inorganiques (0, 100, 200, 300 et 400 kg N·ha ⁻¹ de NPK 20-10-10)		(+) rendement, (+) feuilles/plant, (+) long fruit pour le traitement combiné (org 10 T N·ha ⁻¹ + ino 400 kg N·ha ⁻¹)
Hernandez et al., 2014 	Tomate	Contenants en polystyrène (110 x 25 x 23,5 cm) contenant 40 kg de loam sableux. Chaque compost apportait 10,2 g N par contenant.	9 traitements: 3 inorganiques (solution de Hoagland) (ino 100 %, ino 66 % irrig 2/3, ino 20 % irrig 1/5, soit 8,2, 5,0 et 1,5 g N par plant en 23 semaines (dont 10 de récolte); 2 organiques (compost fumier mouton/chèvre (contenant 2.2 g N·100 g ⁻¹) appliqué à 50.5 t·ha ⁻¹ , compost fumier et branches olivier (contenant 1,9 g N·100 g ⁻¹) appliqué à 40 t·ha ⁻¹); 4 mixtes (fumier 50.5 t·ha ⁻¹ + irrig 1/2, fumier 50.5 t·ha ⁻¹ +irrig 1/5, fumier 40 t·ha ⁻¹ +irrig 1/2, fumier 40 t·ha ⁻¹ +irrig 1/5)	(+) acidité titrable, (+) °Brix pour la fertilisation combinée pas d'effet (forme et taille des fruits) pas d'effet (pH, conductivité électrique, pourcentage de jus et matière sèche)	(+) rendements en fertilisation combinée (organique + inorganique) (-) rendements dans les traitements d'azote organique (compost) (-) contenu en N (feuilles et fruits) pour les traitements organiques
Hsu et al., 2009 	Chou	100 mL·jour ⁻¹ de solution fertilisante (inorganique) et farine de soya (organique)	organique (farine de soya fermentée; 12 % N), inorganique (fertilisant commercial 25-5-20 en fertigation; .0083 g N·jour ⁻¹ ·plant ⁻¹ (33 mL))	(+) anthocyanes chez les plants non fertilisés	(+) biomasse des plants suite à la fertilisation organique (-) contenu en N foliaire suite aux traitements organiques

Liu et al.,
2014



Laitue

Pots de 4,5 kg de sol

7 traitements: 1 témoin sans azote; **2 inorganiques** (200 et 400 kg N·ha⁻¹ sous forme de NH₄NO₃); **2 organiques** (200 et 400 kg N·ha⁻¹ sous forme de poudre de soya/riz fermentée); **2 mixtes** (organique 200 kg N·ha⁻¹ + fertilisation liquide; organique 400 kg N·ha⁻¹ + fertilisation liquide)

(-) nitrates

(-) largeur feuilles, (+) longueur feuilles. (+) croissance fertilisation combinée (org + inorg)
(+) surface foliaire
(+) chlorophylle (SPAD) et (+) hauteur des plants pour fertilisation org ou mixte

Lopez et al., 2014

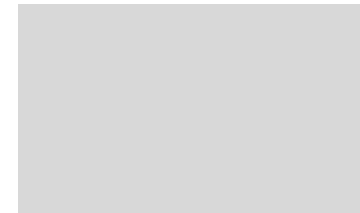


Laitue

Pots de loam argileux (pH 7,7) fumier mouton poulet 4:1. Même taux d'azote pour tous les traitements.

8 traitements: 3 inorganiques liquides (urée, NH₄H₂PO₄ et KNO₃) **5 fertilisants organiques** commerciaux d'entreprises espagnoles

activité antioxydante non dépendante de l'origine de l'azote



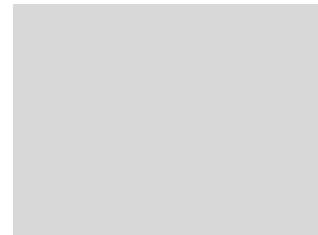
Mahmoud et al., 2009



Concombre

Plein sol. Unités de 4 x 5 m

13 traitements: 1 inorganique, 3 organiques (compost animal, végétal et mixte), **9 mixtes** (3 ratios x 3 combinaisons): 75:25, 50:50, 25:75 (N minéral:compost végétal, N minéral: compost animal et compost végétal:compost animal)



(+) rendement fertilisation combinée (-) [NO₃] dans les pétioles

Santiago-Lopez et al., 2016



Concombre

Sacs plastique 20 L, sable et vermiculite

2 traitements: solution inorganique (steiner) et organique (thé de compost)

(+) capacité antioxydante

(-) rendements

Toor et al., 2006



Tomate

Boîtes de plantation de 4 plants. 650 mg N·plant⁻¹·semaine⁻¹

5 traitements : 3 inorganiques (ratios NH₄:NO₃) et **2 organiques** (fumier de poulet et farine de sang; gazon et paillis de trèfle)

(+) vitamine C, phénols

(=) rendements

(-) biomasse des plantules

Hypothèses et objectifs

Hypothèse 1

Étant connue pour avoir un impact positif sur les rendements, une fertilisation azotée élevée affecterait négativement la qualité de la tomate et du concombre de serre cultivés en régie biologique. Une élévation de la dose se traduirait par une diminution de l'acidité titrable et du contenu en solides solubles. Au niveau des métabolites secondaires, une baisse de la vitamine C, de certains caroténoïdes et des composés phénoliques devrait être observée suite à une élévation de la dose d'azote. Les nitrates accumulés dans le fruit devraient aussi être supérieurs lorsque des doses plus importantes d'azote sont utilisées.

Objectif 1

Évaluer l'effet de différentes doses (0-150 %) d'azote sur la qualité des fruits produits et la performance agronomique de la tomate et du concombre ainsi que sur l'activité biologique du milieu de culture chez la tomate dans un contexte de culture biologique.

Hypothèse 2

Étant donné que la fertilisation organique est ajustée en fonction de la vitesse de libération des formes d'azote assimilables par la plante, les rendements et la croissance attendus sont les mêmes pour les trois sources d'azote (organique, mixte et inorganique). Les paramètres de qualité seraient toutefois différents. L'acidité titrable, la vitamine C et les phénols seraient présents en plus grande quantité dans les fruits issus d'une fertilisation azotée organique. Quoique la fertilisation organique soit ajustée en fonction de la disponibilité des éléments nutritifs qui y sont relâchés, le fait que la libération des formes d'azote assimilables soit plus lente lorsque celui-ci est fourni sous forme organique pourrait stimuler la production de composés carbonés tels que les polyphénols dans la plante. De plus, un apport en azote sous forme organique pourrait stimuler l'activité microbologique du milieu de culture (effet biostimulant) et avoir pour effet d'augmenter la disponibilité des formes minérales entrant dans la synthèse des métabolites secondaires (Worthington, 2001).

Objectif 2

Évaluer l'effet de la source d'azote sur la qualité nutritionnelle et la performance agronomique chez la tomate et le concombre ainsi que sur l'activité biologique du milieu de culture de la tomate.

Chapitre 2: Nitrogen application rate and source effects on growing medium biological properties and fruit quality of organic greenhouse tomato and cucumber

Résumé

Soutenue par la demande croissante pour des aliments produits de façon durable et nutritifs, l'agriculture biologique représente un secteur en plein essor à travers lequel la fertilisation organique joue un rôle majeur. L'objectif de cette étude était ainsi d'évaluer l'effet de la source (organique, inorganique ou mixte) et de la dose (0-150%) d'azote sur la performance agronomique et la qualité des fruits de la tomate et du concombre ainsi que de l'activité biologique du milieu de culture de la tomate. Deux expériences factorielles en blocs complets aléatoires ont été réalisées, l'une avec une culture de concombre et la seconde avec une culture de tomate. Pour la dose d'azote normale (100 %) chez la tomate, l'utilisation d'une source d'azote organique a augmenté la respiration du milieu de culture de 88 %, l'activité enzymatique de 42 %, l'abondance fongique et bactérienne respectivement de 238 % et 31 %. La qualité des fruits, le rendement et la croissance n'ont pas différé selon la source et la dose d'azote étudiées, autant chez le concombre que chez la tomate. L'étude a démontré que la fertilisation azotée organique influence positivement l'activité biologique du milieu de culture lorsque tous les autres paramètres culturaux sont contrôlés.

Abstract

Supported by the increasing demand for sustainable and nutritious food, organic farming is an expanding industry. Since fertilization is a major difference between organic and conventional farming, the objective of this study was to evaluate the effect of the nitrogen source (organic, inorganic and mixed) and application rate (0-150%) on agronomic performance and fruit quality for tomato and cucumber and on growing medium biological activity for tomato. Two randomized complete block factorial experiments were then carried out, one with a cucumber culture and the second one with a tomato culture. For a standard nitrogen application rate (100%), the use of organic nitrogen as compared to inorganic nitrogen increased the respiration rate of the tomato growing media by 88%, the enzymatic activity by 42%, and fungi and bacteria abundance by 238% and 31%, respectively. However, N treatments did not affect fruit quality, plant growth and yield of cucumber and tomato crops. The present study demonstrated that organic nitrogen fertilization positively influenced the biological activity of the growing medium compared to inorganic nitrogen, despite the fact that all other growing conditions were similar.

Introduction

The consequences of intensive use of agrochemicals are now well known in terms of erosion, soil acidification, greenhouse gas emissions, water contamination and biodiversity loss (Bouraoui and Grizzetti, 2014; Camargo and Alonso, 2006; Meier et al., 2015; Nosengo, 2003). Furthermore, consumers are more and more looking for locally produced and high quality food which led to an increase of organic farming during the last decade. Organic market size has increased 5.8 fold over the last 15 years and by 10% between 2014 and 2015, reaching 81.6 billion US dollars (Willer and Lernoud, 2017). These organic production systems contribute to maintaining the profitability of local farmers who are oriented towards high-quality production in order to remain competitive in the greenhouse vegetable market. For larger greenhouse facilities, the expanding demand for organic food constitutes interesting market opportunities.

Tomato and cucumber contain phytonutrients that can be valued through different cultural practices such as cultivar selection and climate management. Those compounds may have a positive potential for human health influencing gut microbiota (Desjardins, 2016). Soluble solids content and titratable acidity, respectively, affects fruit sweetness and sourness and are then relevant quantitative indicators for fruit taste determination (Zushi and Matsuzoe, 2011). However, there is hitherto no consensus in the literature regarding the influence of the mode of culture, whether organic or conventional, on fruit quality.

Nitrogen fertilization represents a major difference between those two growing systems since organic fertilizers usually have to be mineralized before being absorbed by the plant. Organic nitrogen uptake by plants was recently well summarized (Näsholm et al., 2009). This aspect could increase differences in terms of plant-soil-microbe interactions when nitrogen source varies between cultures (Inselsbacher et al., 2011). Organic amendments could impact soil processes and microorganisms metabolism. This may, in turn, influence secondary metabolites synthesis (Mitchell et al., 2007, Reeve et al., 2017). Lower availability of nutrients in organic production often leads to higher secondary metabolites production (Montagu and Goh, 1990; Toor et al., 2006). Our first hypothesis was that growing medium biological activity and fruit quality could be increased following use of organic nitrogen amendments, as compared to inorganic ones, without negatively impacting the yield. To test this hypothesis, fertilizer requirements were adjusted according

to available-N rather than to total-N for organic treatments, expecting similar yield between nitrogen sources.

In order to minimize negative environmental impact of fertilization and to maximize soil fertility resulting in sustainable yields, it appears important to understand the effect of various nitrogen application rates on fruit quality, plant agronomic performance and growing medium biological characteristics. As nitrogen fertilization is difficult to manage in organic crops with unbalanced fertilizers, growers often over-fertilize their crops (Voogt et al., 2011). Our second hypothesis was that, in response to an increase of nitrogen application rate, yield would be higher and fruit quality lower. Such higher yields expected agree with the literature where higher nitrogen application rates increase nitrogen availability for the plant growth and development (Feijuan et al., 2012; Jasso-Chaverria et al., 2005). However, too high application rates (excess of nitrogen) may not increase yields (Feijuan et al., 2012; Jasso-Chaverria et al., 2005), while low nitrogen applications may enhance secondary metabolite accumulation like phenolic compounds as abiotic stress is increased (Ochoa-Velasco et al., 2016). Since then, production of high-quality food in a sustainable system represents an economic and environmental issue. The objective of this study was to evaluate the effect of the nitrogen source and application rate on fruit quality and agronomic performance for tomato and cucumber and on the biological activity parameters of the tomato growing media. Experimentation was realized for two greenhouse organic crops: cucumber and tomato, when the other growing conditions were kept identical.

Materials and methods

Experimental design and greenhouse growing conditions

The first experiment was performed with cucumber (*Cucumis sativus* L., cv. Verdon) between May 19 and August 8, 2016 (Table 1). Each experimental unit had four plants, corresponding to a plant population of 1.8 plants·m⁻². A factorial design combining three nitrogen sources (organic, mixed and inorganic), three nitrogen application rates (50%, 75% and 100%) and a control (N=0%) was carried out using a randomized complete block design with three replicates.

From August 2, 2016 to January 11, 2017 (Table 1), a second experiment with tomato (*Solanum lycopersicum* L., cv. Trust) was conducted using a randomized complete block design with six replicates (except for the 150% organic treatment which counted only five replicates). The factorial design included two nitrogen sources (organic and inorganic) and three nitrogen application rates (50%, 100% and 150%). Each experimental unit had six plants, corresponding to a plant density of 2.4 plants m⁻².

Table 1. Growing calendar of the two cultures experimentations.

	Cucumber	Tomato
Sowing	19-05-2016	02-08-2016
Potting	-	24-08-2016
Transplanting	15-06-2016	16-09-2016
First harvest	11-07-2016	21-11-2016
Last harvest	08-08-2016	12-01-2017

Experiments were conducted in a 150 m² double polyethylene greenhouse at Laval University (Québec, QC, Canada; 46°49'N, 71°15'W). The air temperature, CO₂ and humidity were controlled using Priva's Greenhouse Management System (Priva North America, Vineland Station, Ontario, Canada).

During the cucumber experiment, the average temperature were 24.7 ± 0.9 °C (day) and 21.6 ± 0.7 °C (night) and average relative humidity were 57 ± 8% (day) and 71 ± 8% (night). Average CO₂ concentrations were 489 ± 5 ppm (day) and 549 ± 21 ppm (night). Average weekly calculated natural radiation incident on the crop was 10030 ± 1599 J·cm⁻²·wk⁻¹ (corresponding to 474 ± 76 μmol·m⁻²·s⁻¹).

During the tomato experiment, the average temperature were 21.3 ± 2.3 °C (day) and 18.6 ± 2.4 °C (night) and the average relative humidity were $58 \pm 7\%$ (day) and $61 \pm 3\%$ (night). Average CO₂ concentrations were 530 ± 8 ppm (day) and 609 ± 35 ppm (night). Average weekly calculated natural radiation incident on the crop was 4619 ± 1838 J·cm⁻²·wk⁻¹ (corresponding to 127 ± 84 μmol·m⁻²·s⁻¹). Natural solar radiation was calculated using 70% of the value measured by an exterior quantum sensor located on the greenhouse's roof. High pressure sodium (HPS) grow lights (Master Green Power SON-T PIA, Philips Integrated Antenna, 600W, Philips, Amsterdam, Netherlands) were used at 16 h photoperiod. Those lights were supplying, in average, 2191 ± 930 J·cm⁻²·wk⁻¹ during the tomato experiment.

The water potential of the growing media was monitored by using tensiometers placed at a depth of 20 cm in each experimental unit. Tensiometers were made with a stainless steel tube fixed with a porous ceramic filter and paired with pressure transducers ProSense® PTD25-20-VH (Munich, Germany). A pressure of 50 kPa was targeted before irrigation (one or two irrigation·day⁻¹). The plants received on average 0.5-1.5 L of water daily through a spray nozzle irrigation system (Naandan France, Toulouse, France). There were two spray nozzles separated from 70 cm each other in each growing container.

Each experimental unit consisted of a 0.62 m³ (42.5 cm x 150 cm x 80 cm) growing containers filled with an organic substrate (which included compost, perlite, blond peat moss, brown peat, coconut fibre, seaweed extract, granulated poultry manure 5-3-2 (Acti-Sol®, pure hen manure), sulfate of potash magnesia 0-0-22, 11% Mg (Sul-Po-Mag®, Les Engrais Naturels McInnes, Stansted, Canada), calcined clay and lime.

Fertilization treatments

Nitrogen organic amendments used for both experiments were feather meal 13-0-0 (Les Engrais Naturels McInnes, Stansted, Canada), and blood meal 12-0-0 (Plant Products®, Laval, Canada) while inorganic nitrogen source was ammonium nitrate 33.5-0-0 (El Dorado Chemical Company, Oklahoma City, USA). The crops were fertilized weekly using potassium sulfate 0-0-52 (Plant Products®, Laval, Canada), sulfate of potash magnesia 0-0-22, 11% MgO) (Sul-Po-Mag®, Les Engrais Naturels McInnes, Stansted, Canada), calcium chloride (Calcinit, 28% CaO) (Calcinit™, YaraLiva™, Yara International, Oslo,

Norway), bone meal 0-13-0; 31% CaO (Fossil Bone™, Les Engrais Naturels McInnes, Stansted, Canada) and compost 1.2-1.2-1.2 (Fertilo®, Fafard, Saint-Bonaventure, Canada) (Table 2). Standard fertilization (100% application rate) was adjusted by referring to the nitrogen requirements of greenhouse tomato which correspond to 150 kg·ha⁻¹·month⁻¹ between the 10th and 42nd weeks for a density of 2.5 plants·m⁻² (Voogt et al., 2014). The other application rates were then calculated from that standard fertilization. All other nutrients than nitrogen were supplied equally among treatments. The solid fertilizer application was made each week and was followed by manual homogenization over the entire surface of the growing containers. Initial growing medium nitrogen concentrations are shown in Table 3.

During the cucumber experiment, organic, mixed and inorganic treatments received, on average, respectively 2.09, 2.15 and 2.21 g N·plant⁻¹·week⁻¹ for the 100% application rate.

Table 2. Total fertilizer quantities used during the cucumber experiment.

Source	Organic				Mixed				Inorganic			
	0	50	75	100	0	50	75	100	0	50	75	100
Application rate (%)	0	50	75	100	0	50	75	100	0	50	75	100
(g·plant ⁻¹) [*]												
Ammonium nitrate	0	0	0	0	0	12.5	18.8	25	0	26.5	39.8	53
Feather meal	0	31.5	47.3	63	0	16	24	32	0	0	0	0
Blood meal	0	31.5	47.3	63	0	16	24	32	0	0	0	0
Sulfate of potash magnesia	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Potassium sulfate	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Bone meal	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Calcium chloride	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Compost	277	277	277	277	277	277	277	277	277	277	277	277

^{*}Culture from May 19th to August 8th

During the tomato experiment, for the 100% application rate, each plant, received an average of 1.61 and 1.34 g N·plant⁻¹·week⁻¹, respectively for organic and inorganic N amended growing mediums. Just before tomato transplantation, 52.5 L of compressed substrate were added to each experimental unit (OM-1, Berger, Saint-Modeste, Canada) and 700 g of dolomitic lime (Al 85%) per unit was added to adjust the pH (from 4.70 to 5.12, 38 days later).

Table 3. Total fertilizer quantities used during the tomato experiment.

Source Application rate (%) (g.plant ⁻¹)*	Organic			Inorganic		
	50	100	150	50	100	150
Ammonium nitrate	0	0	0	29	58	87
Feather meal	36	72	108	0	0	0
Blood meal	68.5	137	206	0	0	0
Sulfate of potash magnesia	40	40	40	40	40	40
Potassium sulfate	36	36	36	36	36	36
Bone meal	42	42	42	42	42	42
Calcium chloride	54	54	54	54	54	54
Compost	423	423	423	423	423	423

*Culture from September 16th to January 12th

Growing medium measurements

All growing medium samples were made, for each experimental unit, of four subsamples collected at 0-20 cm depth and mixed together, except for earthworm's samples. Growing medium samples were collected weekly in the 100% N treated units (control) to adjust the fertilization. The concentration of the soluble mineral elements in the growing medium solution was then measured using an ion chromatography analyzer (Thermo Scientific™ Dionex™ ISC-1100, , Oakville, ON, Canada) following an aqueous extraction according to the 2:1 volume extract (20 mL of growing medium in 40 mL of water). This extraction of soluble ions was also conducted at four moments (at the transplantation, at the first harvest, at the mid-culture and at the end of the experiment) in all experimental units. During the cucumber experiment, those samples were taken 1, 27, 41 and 52 days after transplantation while during the tomato experiment, they were sampled 38, 59, 81 and 115 days after transplantation. The initial mineral content of growing media are presented in Table 4.

The total mineral content was quantified at the end of the cucumber experiment (8 August 2016) and at the first harvest (14 November 2016) and at the end of the culture (10 January 2016) for tomato experiment, according to the Mehlich-III method (Agri-Food Laboratories, Guelph, ON, Canada). In average, according to the monthly 2:1 extractions,

growing medium pH were 4.8 ± 0.2 (cucumber) and 4.9 ± 0.3 (tomato) and growing medium electrical conductivity (EC) were 1.7 ± 0.5 (cucumber) and 1.1 ± 0.6 (tomato). During the tomato experiment, growing medium biological activity was measured. Growing medium respiration was measured monthly (59, 81 and 115 days after tomato transplantation) using a portable gas exchange system connected to a soil CO₂ flux chamber (LI-6400 and LI-6400-09, LI-COR® Biosciences, Lincoln, NE, USA). Polyvinyl chloride soil collars, serving as a support for the CO₂ chamber, were installed in each experimental unit of the tomato greenhouse crop at least one day before measurements to reduce growing medium perturbation. A measure was taken in each experimental unit before the first irrigation in the morning (cycles = two, target = 550 ppm CO₂, delta = 25 ppm CO₂). Total microbial activity was also quantified each month (38, 59, 81 and 115 days after tomato transplantation) with fluorescein diacetate hydrolysis assay (Adam and Duncan, 2001) using 2 g of fresh growing medium by experimental unit. Thirty earthworms were added in each container in March 2015. Earthworms were sampled twice during the experimental period (81 and 115 days after tomato transplantation) using a 1.57 L cylinder in the first 20 cm growing medium layers (Clapperton, 1996). Metagenomic analysis of growing medium microbial community diversity (fungi, bacteria and eucaryota) were conducted at the Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) in the Microbial Ecology Laboratory (MEL) (Québec, CA) using growing mediums having received a full application rate (100%) for an organic or inorganic nitrogen source during the tomato experiment (samples from 12 experimental units). Genomic ADN quantity and quality were analyzed by spectrophotometry, using the ratio between 260 nm and 280 nm absorbances. Specific primer sequences (Comeau et al., 2011; McGuire et al., 2013) were used for the amplification of the V6-V8 region of bacterial 16S rRNA and eukaryotic 18S rRNA employing dual-indexed PCR approach designed for analysis with the Illumina® MiSeq® sequencing platform. The amplicon libraries were sequenced in paired-end format with a reading of 300 bases on Illumina® MiSeq® at the genomic analysis platform (Institute of Integrative Biology and Systems (IBIS) of Laval University (Quebec, CA)). Data processing was performed on the bioinformatics platform of IRDA's microbial ecology laboratory and included baseline and indices of microbial diversity comparisons and microbial richness (Qiime 1.9 [Caporaso et al., 2010] and R [R Core Team project 2014]). The OTUs tables were filtered before analyses to bring corrections to the very low abundances. For bacteria and eucaryota diversity analyses, SILVA reference database (version 119) (Quast et al., 2013) was used while UNITE reference database (Kõljalg et

al., 2013) was used for fungi analyses. Microbial richness was obtained from respectively 7000, 4500 and 4000 sequences for bacteria, eukaryota and fungi.

Table 4. Initial mineral content in the two cultures growing media.

	Cucumber*		Tomato*	
	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
pH	4.8	0.16	4.7	0.18
CE	2.0	0.4	1.5	0.4
Total N (%)	2.11	0.13	2.06	0.14
N-NO ₃ (mg·kg ⁻¹)**	6876	1086	4300	1726
PO ₄ (mg·kg ⁻¹)**	1311	177	1168	270
K (mg·kg ⁻¹)**	1690	506	2281	501

*Samples were taken on June 15th and August 5th (2016) respectively for cucumber and tomato.

**Soluble content using 2:1 method and ion chromatography analysis (ICS-1100, Dionex Canada Ltd, Oakville, ON, Canada).

Plant measurements

Plant growth was measured each week by measuring stem elongation, stem diameter, leaf length and flower height for the cucumber crop and according to the Tom'Pousse procedure (Lambert et al., 2003) for the tomato crop. Growth was monitored on two plants by experimental unit. Chlorophyll content was also measured weekly on the 5th leaf from the apex (means of two measurements by leaf) using a SPAD chlorophyll meter (Spectrum technologies, Aurora, IL, USA) and chlorophyll fluorescence was evaluated by measuring Fv/Fm ratio (Handy PEA, Hansatech, UK). Biomass of weekly pruned leaves were measured and added to the final plant leaf biomass. At the end of each experiment, fresh and dry biomass of leaves, stems and developing fruits of two plants per experimental unit were measured. Plant tissue was dried at 60 °C for two weeks. Micro- and macro-elements of the leaves and fruit tissues were analyzed using one sample per experimental unit. For the leaf tissue analysis, the sample combined the dried leaves of two plants per experimental unit while for the fruit tissues analysis the sample combined freeze-dried and powdered fruits of the first three clusters. Total nitrogen was determined by Kjeldahl method using a block digester (Isaac and Johnson, 1976) for the colorimetric assay (Spectrophotometer Hitachi-U-1100, Hitachi High-Technologies, Japan) converted nitrogen into ammonia (Nkonge and Ballance, 1982). Magnesium was also extracted by Kjeldahl method (Isaac and Johnson, 1976) and then assayed using atomic absorption

spectrophotometer (Perkin-Elmer 3300, Uberlingen, Germany; Perkin-Elmer corporation, 1982). Copper and boron were extracted by calcination (Conseil des productions végétales du Québec, 1988). Copper dosage was done as previously described for magnesium and boron and was analyzed by colorimetry following the addition of an azomethine-H solution (Conseil des productions végétales du Québec, 1988). Other elements (K, Ca, S, P, Cl, Fe, Mn, Zn, Sr, Rb and Br) were analyzed by X-ray fluorescence (XRF) with a portable spectrometer (Niton XL3t-955 GOLDD + Ultra Mining/Enviro XRF Analyzer, with Portable Test Stand, XL2/3, ThermoFisher Scientific, Waltham, MA) according to the method described by Reidinger et al. (2012).

Fruit quality measurements

During the cucumber experiment, quality analysis was conducted three times, corresponding to three weeks of harvest (from July 19th, July 25th and July 31th) in all the experimental units. Fruits were harvested when its diameter reached 41 mm (Agence canadienne d'inspection des aliments, 2011). During the tomato experiment, fruits for quality measurements were collected three times corresponding to fruits of clusters one, two and three (November 21st, November 30th and December 22nd). For each cluster studied, two fruits per plant were selected for quality measurements on the fresh fruit (colour and firmness). Those two fruits were then pooled together for photochemical analysis. Harvested fruits were at the fifth stage of maturity corresponding to the light-red stage (California Tomato Commission, 2002). At the harvest, each fruit was weighed, physiological disorders (Dorais, 2001) were noted and colour was measured by taking two measurements by fruit (one at each extremity) with a chromameter measuring L*, a* and b* (CIE) values (Konica Minolta, Osaka, Japan). The CIEL * a * b * is a colour space defined according to three numerical values which, combined, make it possible to obtain a colour index. L * represents the brightness of the fruit, ranging from white (0) to black (100), a * is a value on a scale from green (-300) to red (+299) and b* is a value on a colour scale from blue (-300) to yellow (+299) (Abbott, 1999). Tomato fruit firmness was measured using a digital shore durometer HPE-II (Qualitest International, Richmond Hill, Canada), taking two measurements by fruit (one at each extremity). Fruits collected in each experimental unit (for each cluster) were cut, pool together and then separate in two subsamples for quality analyses. The first subsample was conserved at -20°C until the physicochemical analyses (Brix, titratable acids, pH, EC and dry matter content). It was then thawed, crushed and centrifuged and the supernatant was used for analysis

(5000 rpm during 10 min). The second sub-sample was lyophilized during 48 h, finely grounded and stored at -80°C until the antioxidant compounds analyses (carotenoids, phenol compounds and vitamin C).

Total soluble solids was measured using a digital Brix refractometer (ATAGO™ PR-32 α , ATAGO, Tokyo, Japan) and titratable acidity was assessed by titration fruit supernatant (20 mL) using NaOH 0.1 N until reaching pH 8.1 and was then expressed as percent of citric acid. The pH and electrical conductivity (EC) were measured using a pH meter (Fisher Scientific™ accumet™ Excel XL15 pH/mV/Temperature Meter, Thermo Fisher Scientific, Mississauga, Canada).

Carotenoids were extracted at 0°C in the dark from 0.05 g of freeze-dried fruit powder mixed with 10 mL of hexane 100% homogenized and frozen overnight. They were then placed 15 min in a 5°C ultrasonic bath and centrifuged at 5°C for 5 min at 5000 rpm. Then, 1 mL of supernatant was transferred in a new 15 mL tube and solubilized in methanol/dichloromethane (65/35, v/v). The carotenoid determination was made using HPLC Agilent 1260 (YMC™ Carotenoid 5 μ m, 4.6x250mm Column). Column was kept at 35°C. Carotenoids compounds were detected at 272, 290, 325 and 450 nm. Injection volume was 40 μ L, for a run time of 35 min and a flow rate of 1.0 mL min⁻¹. The mobile phase was composed of a gradient of (A) methanol:water (98:2 v/v) and (B) 100% Methyl *tert*-butyl ether (MTBE), initially using a gradient profile of 98:2 (A:B), which then changed to 20:80 after 27 min and to 98:2 from 31 to 35 min.

Phenolic compounds were extracted from 0.5 g of freeze-dried fruit powder homogenized with 10 mL of 80% aqueous methanol, then placed 20 min in a 35°C ultrasonic bath and centrifuged at 5000 rpm for 4 min. The supernatant was then collected and the residue was re-extracted as previously described combining the two extracts (supernatants). The volume was completed to 25 ml with ultra-pure water. Total polyphenols determination was made according to the Folin-Ciocalteu method (Boizot and Charpentier, 2006). Aliquots of 20 μ L of the sample, the standard or the control, 100 μ L of 10-fold diluted Folin-Ciocalteu reagent and 80 μ L of sodium carbonate solution (75 g·L⁻¹) were mixed and incubated at room temperature during an hour. Polyphenols determination was then made with a spectrometer (FLUOstar® Omega, BMG Labtech, Champigny-sur-Marne, France)

by measuring absorbance at 765 nm in 96-well microplate. The standard curve was drawn using the observed absorbance of 50, 100, 250 and 500 ppm of standards of gallic acid. Ascorbic acid was extracted from 0.5 g of freeze-dried fruit powder homogenized with 15 mL of 2% metaphosphoric acid, placed in a mechanical agitator at 4°C for 15 min and centrifuged for 4 min at 4°C to collect the supernatant. The supernatant was filtered through non-sterile 0.45 µm nylon syringe filter. It was then injected to HPLC (Agilent 1100) using a isocratic gradient equipped with a reversed-phase C18 column (Synergi™ 4µm Hydro-RP 80A HPLC Column 250 x 4.6 mm) for the dosage. Ascorbic acid was eluted at room temperature for 9.5 min using an injected volume of 4 µL and a flow rate of 1.0 mL·min⁻¹. Solvent was composed of K₂HPO₄ (0.1 M), MeOH and TBAH (40 wt. % H₂O) (97/3/0.05, v/v/v). Detection was performed by an UV detector at 265 nm. Quantification was carried out by external calibration with ascorbic acid. The calibration curve was set from 1 to 100 mg·L⁻¹ ascorbic acid and the results were expressed in milligram per gram dry matter (mg·g⁻¹ DM).

Statistical analysis

Data were analyzed using the MIXED procedure of SAS® software, version 9.4 (SAS Institute, Cary, NC) in a model (two-way ANOVA) with source, application rate and source x application rate interaction as fixed effects and block as random effect (for cucumber trial, treatment 0% was not included in this analysis). A one-way ANOVA was conducted to compare the microorganism abundance, since their determination was only performed for a standard application rate (100%). Measurements made at different times were pooled for those analyses. Differences between treatments least square means were compared using Tukey's multiple-range test at $P \leq 0.05$. For the cucumber trial, a model with treatment as fixed effect and block as random effect was used to compare the control group (N = 0%) to the other nine treatments. To do this, a Dunnett's test was conducted when $P \leq 0.05$. Principal coordinate analyses (PCoA) were assessed to visualize the dispersion of growing medium microbial communities using Bray & Curtis index for microbial composition comparisons. PCA considering only growing medium variables was conducted. Spearman correlations were assessed to underline links between variables without being influenced by extreme data measurements.

Results

Growing medium parameters

Tomato greenhouse experiment

During the tomato greenhouse experiment, growing medium CO₂ efflux (growing medium respiration), microbial activity, earthworm biomass and microorganism abundance were higher ($p \leq 0.05$) in the organically fertilized units compared to the inorganically treated ones for a standard fertilization rate.

CO₂ efflux

The effect of nitrogen application rate on growing medium CO₂ efflux was significantly different depending on the nitrogen source (interaction source * application rate; $p = 0.004$) (Figure 1a). For the organic nitrogen source, there was a linear increasing effect ($p = 0.011$) of the application rate on the CO₂ efflux, efflux values corresponding to 12.5, 14.8 and 19.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for the three application rates of 50%, 100% and 150%, respectively. The opposite linear effect was observed for inorganic nitrogen source ($p = 0.049$), values corresponding to 10.5, 7.9 and 7.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for the three application rates of 50%, 100% and 150%, respectively (Figure 1a). For the standard N rate of 100% of the estimated plant needs, CO₂ efflux was 88% higher in the organically treated growing media compared to the inorganically treated ones while it was 155% higher under 150% application rate.

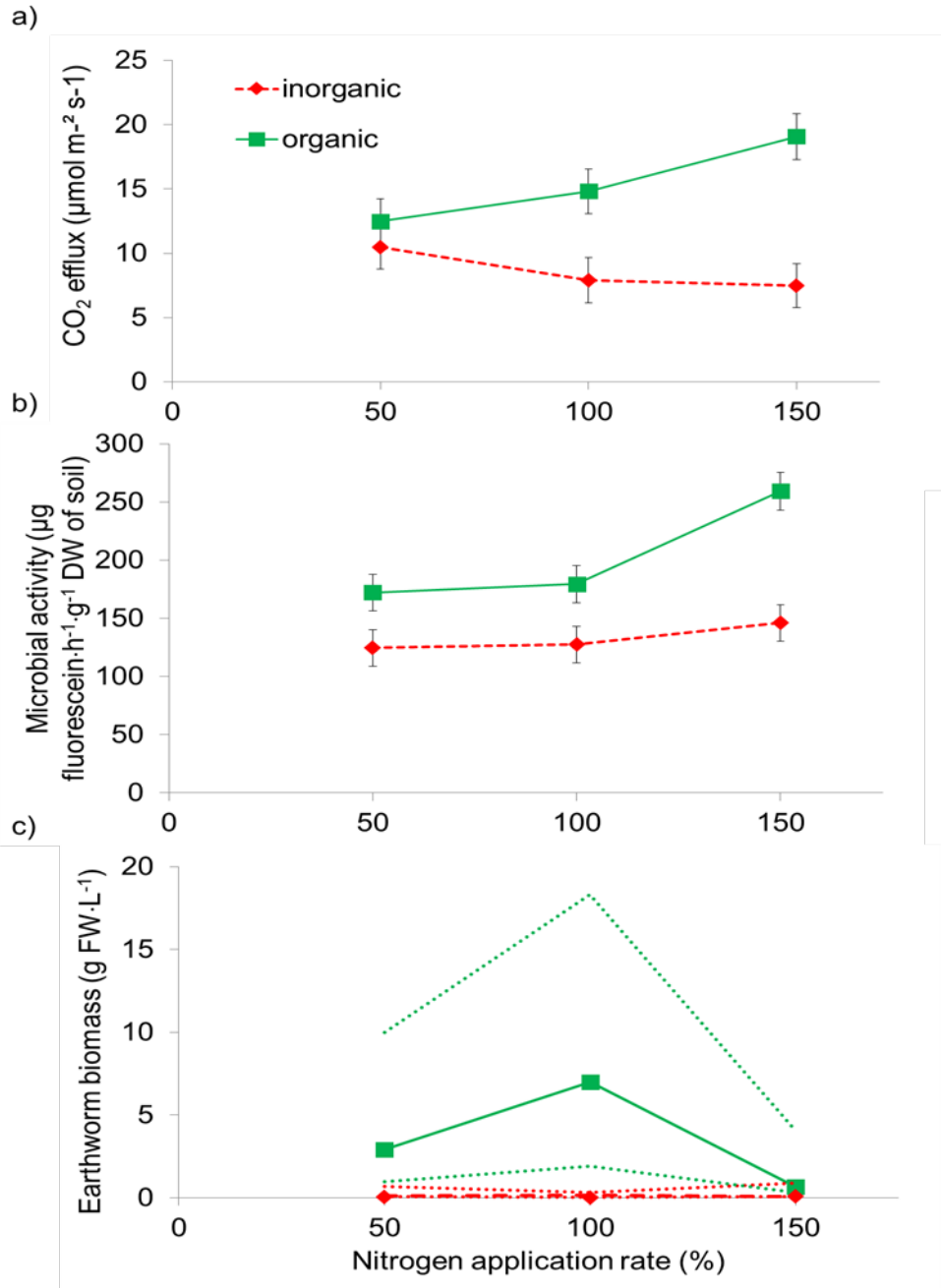


Figure 1. Growing medium biological parameters according to the nitrogen source and application rate during the tomato greenhouse experiment. Data are means of $n = 6 \pm \text{SE}$. a) Growing medium respiration (CO_2 efflux). Data are means of the three moments where CO_2 efflux was measured (59, 81 and 115 days after transplantation). b) Total growing medium microbial activity. Data are means of the four measurements after tomato transplantation (38, 59, 81 and 115 days after transplantation). c) Earthworm biomass in the tomato greenhouse. Data are means of the two measurements (81 and 115 days after transplantation). The 95% confidence intervals are represented by dotted lines for both nitrogen sources treatments. Confidence interval is presented because a logarithmic transformation has been applied to the data to correct the heterogeneity of the variances.

Microbial activity

Similarly to the CO₂ efflux, there was a significant interaction between the nitrogen application rate and source for the total enzymatic microbial activity expressed by the hydrolysis of FDA ($p = 0.03$) (Figure 1b). The microbial activity of the organic nitrogen treatments (172, 180 and 259 for 50%, 100% and 150% application rates, respectively) increased linearly with the application rate ($p = 0.02$), while no application rate effect was observed for the inorganic nitrogen treatments (125, 127 and 146 for 50%, 100% and 150% application rates, respectively) ($p = 0.42$). Thereby, there was an increase of 38%, 41% and 77% of the microbial activity in the organically treated growing media with 50%, 100% and 150% nitrogen treatments, respectively, compared to the inorganically treated ones (Figure 1b).

Earthworm biomass

A significant interaction ($p = 0.007$) between the nitrogen source and application rate treatments was also observed for the earthworm biomass (Figure 1c). A quadratic effect of the earthworm biomass according to the application rate was observed for the organic nitrogen treatments (2.9, 7.0 and 0.7 for 50%, 100% and 150% application rates, respectively) ($p = 0.010$), while there was no effect of the application rate with inorganic nitrogen treatments (0.12, 0.15 and 0.07 for 50%, 100% and 150% application rates, respectively) ($p = 0.72$). In the organically treated growing media, earthworm biomass was 47 times higher at the rate of 100% ($p = 0.017$), 24 times higher at the rate of 50% ($p = 0.039$) and 10 times higher (not significant) at the rate of 150% ($p = 0.081$) compared to the growing media amended with inorganic nitrogen.

Microorganism abundance

The microorganism abundance and composition determination were only performed for tomato under a standard application rate (100%). At this standard application rate of 100%, the abundance of growing medium microorganisms between the organic and inorganic nitrogen sources significantly differed for fungi (Figure 2a; $p = 0.003$) and for bacteria (Figure 2b; $p = 0.037$) according to the nitrogen source (Figure 2). Following the application of organic nitrogen, bacteria abundance was 1.3 times higher and fungi abundance was 3.4 times higher than the inorganic nitrogen treatments.

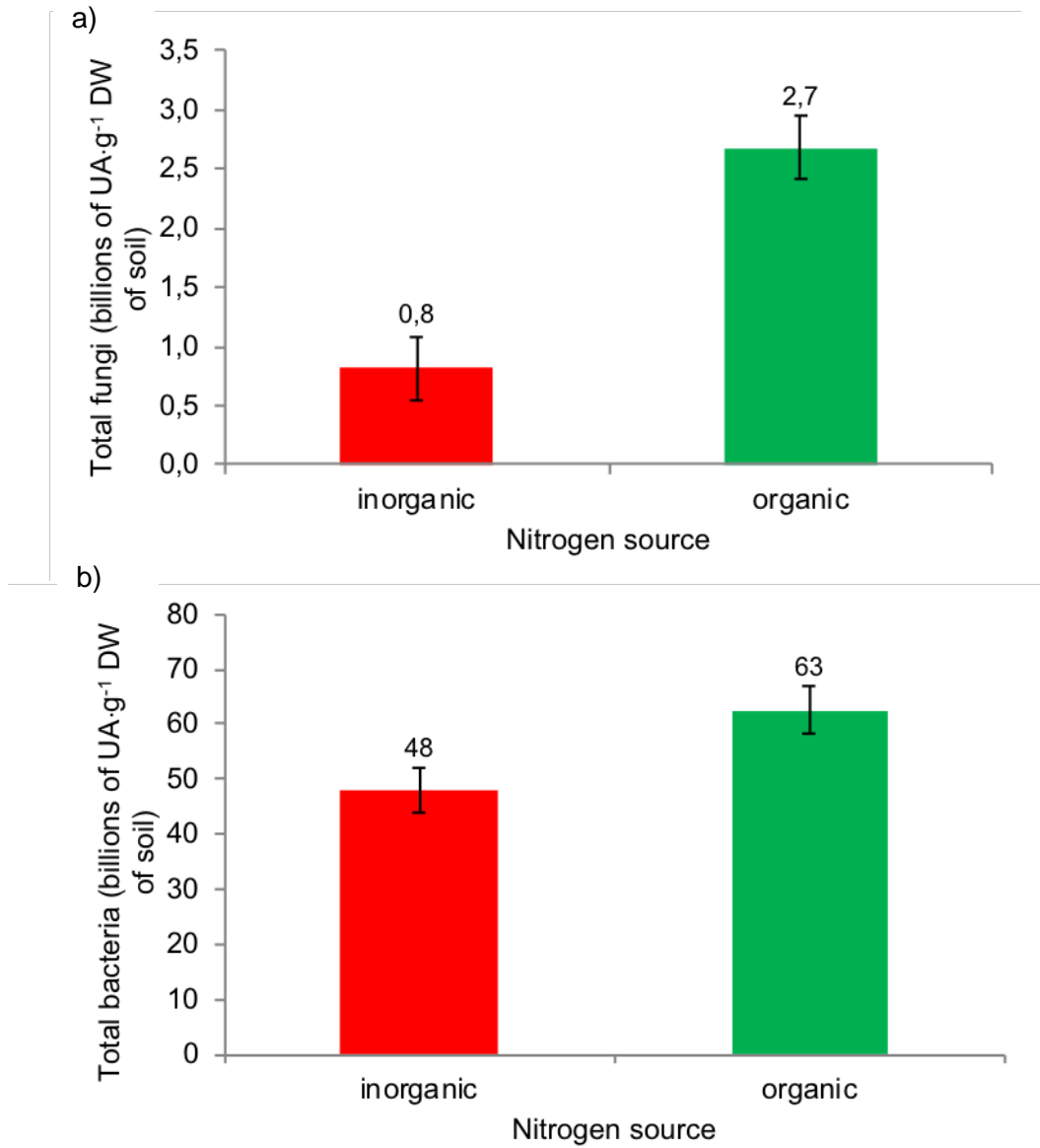


Figure 2. Total microorganism abundance in the growing medium after a qPCR analysis during the tomato experiment and at 100% application rate. a) Fungi abundance. b) Bacteria abundance. Data are means of $n = 6 \pm SE$.

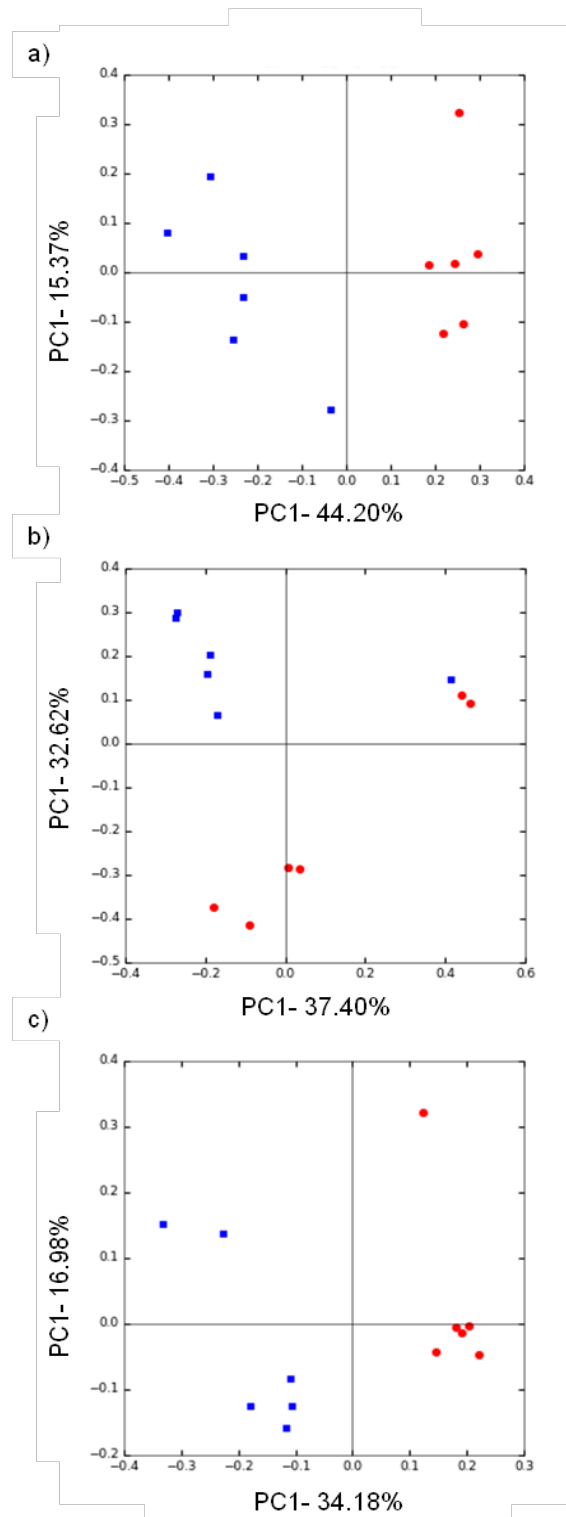


Figure 3. PCoA of a) bacteria, b) fungi and c) eucaryota growing medium communities (blue squares = organic; red circles = inorganic; n = 6) during the tomato experiment.

Microorganism composition

As shown by the PCoAs of Figure 3, under a standard fertilization of 100%, the nitrogen source affected the microbial composition of the growing medium as, for bacteria and eucaryota, most data from the organic nitrogen source are located in the two left quadrats while the ones from the inorganic nitrogen source are mostly located in the right quadrats. In the PCoA of bacteria growing medium communities (Figure 3a), 44% of the variation was explained by the horizontal axis, while the first axis of the PCoA of eucaryota explained 34% of the variation of data distribution (Figure 3c). Fungi growing medium communities were separated along the two principal axes (PCA1 = 33%, PCA2 = 37%) according to the nitrogen source. Therefore, not only abundance but also composition of growing medium microorganisms was influenced by the nitrogen source.

Table 5. Dominant bacterial, fungal and eukaryotic groups expressed by Shannon's index and according to the nitrogen source (for a standard application rate of 100%).

Shannon index	Organic*	Inorganic*	SE	<i>p-value</i>
Bacteria (class)	2.263	2.523	0.027	0.001
Fungi (class)	2.381	2.602	0.140	0.276
Eucaryota (phylum)	1.971	1.912	0.102	0.576

*Means of n = 6.

The diversity of the dominant bacteria species, expressed as the Shannon index, was significantly higher in the inorganically treated units compared to the organically treated ones while no difference was observed for fungi and eucaryota diversity indexes (Table 5).

Growing medium carbon and pH

Relatively to the soluble organic carbon and the total growing medium carbon content, no significant source or application rate effect was observed (Table 6). The growing medium pH of the 100% application rate was significantly higher than the pH in the 150% and significantly lower than in the 50% application rate (Table 6).

Table 6. Growing medium carbon concentration during the tomato experiment.

	Source		Application rate (%)			SE	<i>p-value</i> ****		
	organic	inorganic	50	100	150		source	rate	source* rate
Soluble organic C (SOC) (mg·kg ⁻¹)*	282	247	247	240	305	38	0.441	0.470	0.097
Total carbon (%)**	38.3	37.5	37.8	37.5	38.5	0.6	0.240	0.440	0.302
pH***	4.92	4.94	5.07 a	4.93 b	4.79 c	0.046	0.474	<.0001	0.483

Letters displayed (on each line) correspond to the differences observed for the application rate effect and were analyzed using a Tukey test ($p < 0.05$).

* 81 days after transplantation

** 115 days after transplantation

*** Means of 38, 59, 81 and 115 days after transplantation

**** Means of $n = 12$ for source effect, $n = 18$ for rate effect and $n = 6$ for source*rate effect.

PCA projection of growing medium main parameters showed that the individuals are differentiated between nitrogen source along the horizontal axis (37.6%) and partly along the vertical axis (25.3%) (Figure 4). Growing medium mineral nitrogen (N_MIN) and soluble organic nitrogen (SON) are strongly correlated with the vertical axis, while soluble organic carbon (SOC), the total carbon (TC) and insoluble nitrogen (TNI) are related to the horizontal axis. Soluble organic carbon (SOC), total carbon content (TC), microbial activity (FDA) and growing medium respiration (EFFLUX) variables are oriented towards organic individuals located in the two right quadrants, especially the individuals having received the highest organic application rate. The pH is oriented towards the individuals having received the lowest nitrogen application rate. The individuals treated with organic nitrogen at an application rate of 150% are all located on the right side of the graphic as those were associated with the highest values of growing medium respiration and microbial activity.

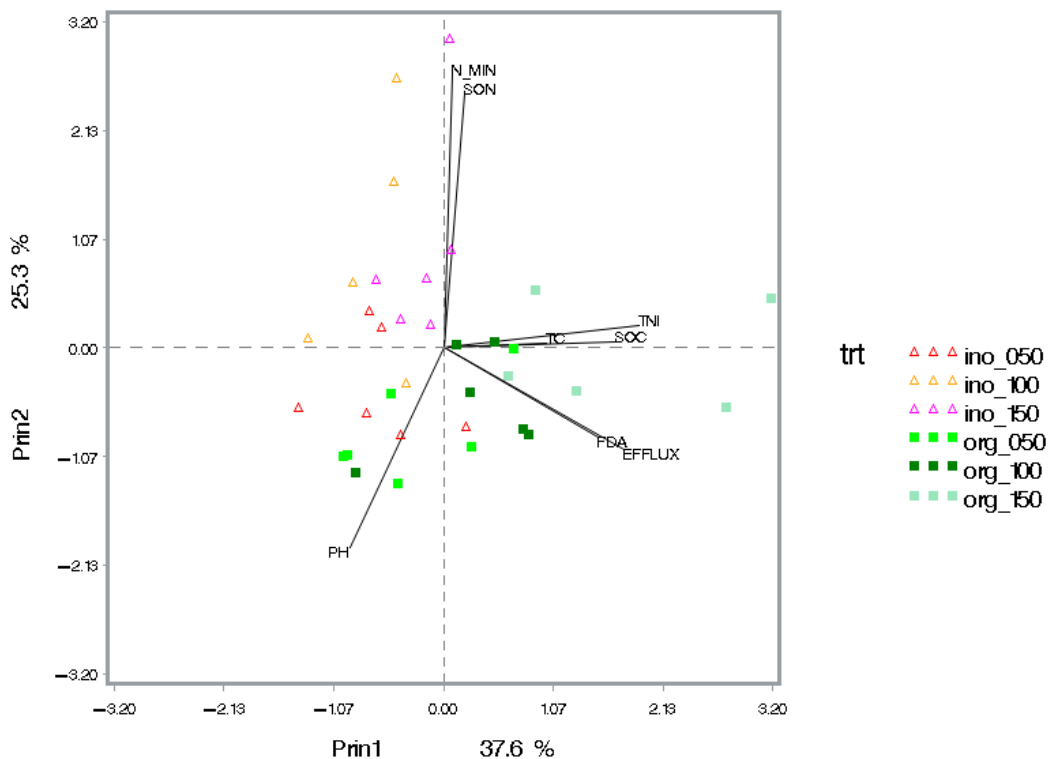


Figure 4. Relationships between growing medium properties during the tomato experiment (PCA) (n = 18).

EFFLUX: growing medium respiration; FDA: total enzymatic microbial activity (FDA hydrolysis); N_min: growing medium nitrate and ammonium concentration; PH: growing medium pH; TC: growing medium total carbon (LECO); TNI: growing medium total insoluble nitrogen; SOC: growing medium total organic carbon (water-soluble); SON: growing medium total organic nitrogen (water-soluble).

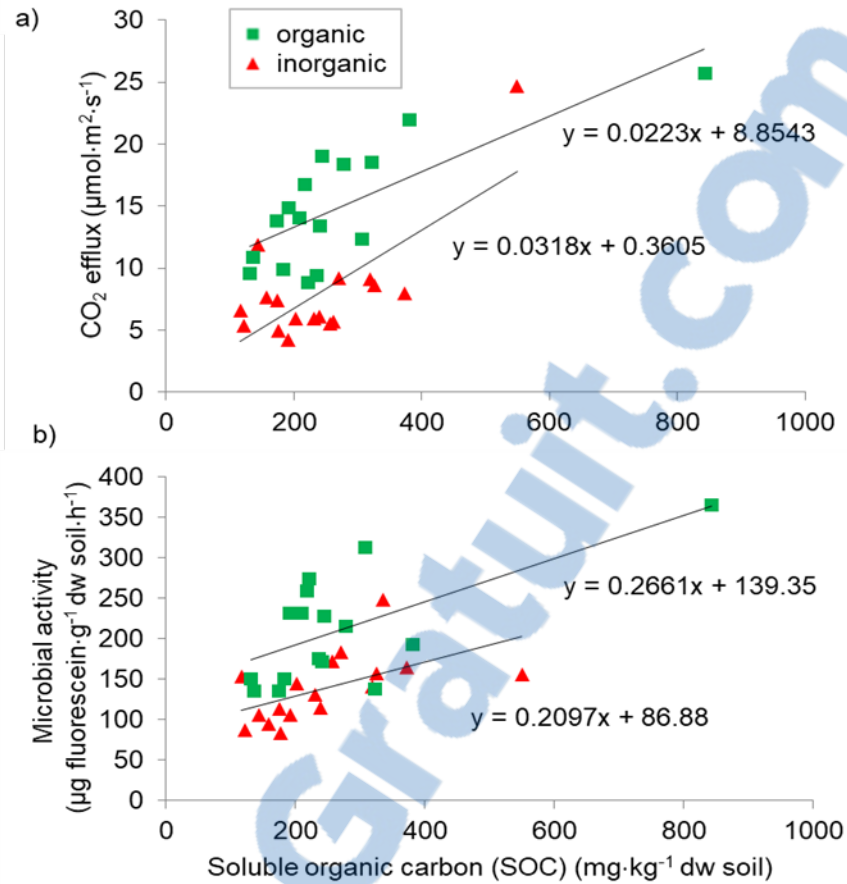


Figure 5. Relationship between soluble organic carbon, CO₂ efflux and microbial activity (n = 18).

Spearman correlation between growing medium soluble organic carbon (SOC) and CO₂ efflux was significant for the organic treatments ($r = 0.63$, $p = 0.009$) but not for the inorganic ones ($r = 0.40$, $p = 0.117$) while correlation between growing medium organic carbon and microbial activity was significant for the inorganic treatments ($r = 0.71$, $p = 0.001$) but not for the organic ones ($r = 0.46$, $p = 0.072$) as shown in Figure 5. The slopes of the relations between soluble organic carbon and both biological parameters were similar and positive for both nitrogen sources.

Growing medium nitrogen content

As expected, growing medium nitrogen content was affected by the nitrogen source and application rate ($p < 0.05$). There was a significant interaction between nitrogen source and application rate for growing medium nitrate (N-NO₃) concentration ($p = 0.02$). This interaction was reflected in the source effect that was only significant at the highest

application rate of 150% (2043 mg·kg⁻¹ dw soil in the inorganically treated units compared to 1230 mg·kg⁻¹ dw soil in the organically treated units, at an application rate of 150%) (p = 0.004). Globally, N-NO₃ concentration was maintained at 970 mg·kg⁻¹ dw soil and 1383 mg·kg⁻¹ dw soil, respectively for organic and inorganic treatments, corresponding to respectively 297 ppm N-NO₃ and 417 ppm N-NO₃ in the extraction solution (calculated from 2:1 water volume and growing medium water content). N-NO₃ corresponded to 228, 348 and 507 ppm in the extraction solution respectively for 50%, 100% and 150% application rates. Growing medium N-NH₄ was significantly higher in the inorganically treated growing media (2.3 times higher) compared to the organically treated ones, values corresponding respectively to 141 and 62 mg·kg⁻¹ dw soil of N-NH₄ for inorganic and organic treatments. N-NO₃ was the dominant soluble form (91% and 94% for inorganic and organic nitrogen sources, respectively) compared to N-NH₄ form (9% and 6% for inorganic and organic nitrogen sources, respectively).

Growing medium total nitrogen content was 27% higher in the growing media treated with organic nitrogen (1.9%) compared to the inorganic ones (1.5%) and was in average 33% higher at the highest nitrogen application rate of 150% (2,0%) compared to 100% (1.6%) and 50% (1.4%) application rates (Table 7). Soluble organic nitrogen (SON) was 1.9 times higher in the inorganically treated growing media compared to the organically treated one (p = 0.046). Growing medium nitrate nitrogen concentration was correlated with soluble organic carbon for the organic treatments (r = 0.56, p = 0.024) but not for the inorganic ones (r = -0.09, p = 0.729) (Figure 6).

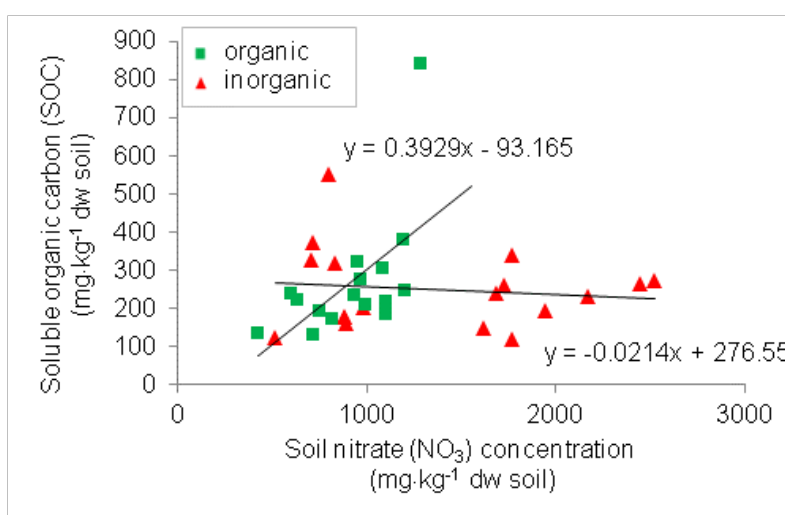


Figure 6. Relationship between soluble nitrate nitrogen concentration and soluble organic carbon content (n = 18).

Table 7. Nitrogen concentration in tomato tissues and in the growing medium.

		Source		Application rate (%)			SE	<i>p-value</i> ^{*****}		
		organic	inorganic	50	100	150		source	rate	source*rate
N total (%) [*]	growing medium	1.9 A	1.5 B	1.4 b	1.6 b	2.0 a	0.2	<0.001	<0.001	0.236
Soluble organic N (SON) (mg·kg ⁻¹) ^{**}	growing medium	385 B	728 A	367	727	575	146	0.046	0.204	0.345
N-NO ₃ (mg·kg ⁻¹) ^{***}	growing medium	970	1383	750	1142	1637	124	<0.001	<0.001	0.018
N-NH ₄ (mg·kg ⁻¹) ^{***}	growing medium	62 B	141 A	29 a	94 b	181 c	26	<0.001	<0.001	0.141
Total N (mg·kg ⁻¹) [*]	leaves	3.2	3.1	2.9 b	3.2 a	3.2 a	0.2	0.219	0.009	0.403
Total N (mg·kg ⁻¹) [*]	fruit	2.5	2.5	2.5 ab	2.4 b	2.6 a	0.1	0.306	0.031	0.137
N-NO ₃ (mg·kg ⁻¹) ^{****}	fruit	16.1	14.3	15.1	14.2	16.3	2.8	0.237	0.533	0.404

Letters displayed (on each line) correspond to the differences observed between application rates following a Tukey test while capital letters represent significant differences between sources ($p < 0.05$).

^{*} 115 days after transplantation (end of culture)

^{**} 59 days after transplantation (middle of the culture)

^{***} Means of nutrient concentration at 38, 59, 81 and 115 days after transplantation

^{****} Means for fruits harvested on the three first clusters

^{*****} Means of $n = 12$ for source effect, $n = 18$ for rate effect and $n = 6$ for source*rate effect.

Cucumber greenhouse experiment

In the cucumber experiment, there was no significant difference ($p < 0.05$) in the growing medium total N and N-NO₃ concentration according to the nitrogen source and application rate (Table 8). N-NH₄ was significantly higher for the inorganic nitrogen source compared to the mixed nitrogen source.

According to the multiple-range test (conducted after ANOVA 1), N-NH₄ was significantly lower in the control ($< 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) treatment than in the 75% inorganic treatment ($57.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($p < 0.05$) while there was no other significant difference between the control and the other treatments. No significant differences were observed relatively to the tissue measurements of nitrogen content (Table 8).

Table 8. Nitrogen concentration in cucumber tissues and in the growing medium.

		ANOVA 1*		ANOVA 2**							<i>p-value</i> *****		
		Control	<i>p</i> -value	Application rate (%)			Source			SE	<i>p-value</i> *****		
		0	trt	50	75	100	inorganic	mixed	organic		source	rate	source* rate
Total N (%)***	growing medium	2.88	0.064	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	0.1	0.777	0.410	0.767
N-NO ₃ (mg·kg ⁻¹)****	growing medium	680	0.056	962	1081	1151	1115	1116	1038	102	0.601	0.110	0.695
N-NH ₄ (mg·kg ⁻¹)****	growing medium	<1	0.028	11.6	5.7	12.9	18.6 a	9.9 b	13.1 ab	9.6	0.006	0.541	0.231
Total N (mg·kg ⁻¹)***	leaves	3.5	0.012	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9	0.1	0.194	0.257	0.417
Total N (mg·kg ⁻¹)***	fruit	2.6	0.087	2.7	2.7	2.8	2.7	2.7	2.7	0.1	0.337	0.055	0.398
N-NO ₃ (mg·kg ⁻¹)****	fruit	348.8	0.434	378	381	394	384	384	378	23	0.706	0.591	0.390

Letters displayed (on each line) correspond to the differences observed after using a Tukey test and did not include the control ($p < 0.05$) regarding the ANOVA 2.

* ANOVA 1 (one-way ANOVA) was performed by analyzing the ten treatments of the experiment, including control ($n = 30$). A Dunnett test was performed following a significant ANOVA 1, comparing the control (0%) to the nine other treatments.

** ANOVA 2 (two-way ANOVA) was realized by integrating the two factors at the analysis (source and application rate) while excluding the control (0%) ($n = 27$).

*** Measurements taken 52 days after transplantation.

**** Means of nitrate for fruits harvested during the first three weeks of harvest first.

***** Means of nutrient concentration at 1, 27, 41 and 52 days after transplantation.

***** Means of $n = 9$ for source effect, $n = 9$ for rate effect and $n = 3$ for source*rate effect.

Growth parameters

Nitrogen application rate had a significant effect on tomato tissue nitrogen content, while no N source effect was observed. Specifically, total N content of leaves was 10% higher at 100% N (3.2%) and 150% N (3.2%) application rates compared to 50% N (2.9%) application rate (Table 7). Fruit total N content increased by 8% when the nitrogen application rate enhanced from 100% to 150%. However, no significant difference was observed between those two application rates and 50% application rate (Table 7).

During the cucumber culture, the leaf nitrogen content showed a significant difference according to the treatment (ANOVA 1, $p = 0.01$) (Table 8). Following the Dunnett test, total N contained in leaf tissue was significantly lower in the control (0%) treatment than in the mixed and organic treatments for the 75% and 100% application rates ($p < 0.05$).

For both studied species, tomato and cucumber, the N source and application rate treatments did not significantly affect plant biomass (leaves, stems and developing fruits), specific leaf area and weekly growth parameters (elongation, stem diameter, fifth leaf length, flowering height and fruit size) at $p < 0.05$ (Table 9 and Table 10). Tomato fruit development parameters (fruit load and fruit set) did not differ either. No significant interaction between N source and application rate treatments was observed.

Table 9. Growth parameters of tomato plants.

Growth parameters	Application rate (%)			Source		SE	<i>p-value</i> *			
	50	100	150	organic	inorganic		source	rate	source* rate	
Dry biomass	Stems (g)	64.69	66.20	69.29	68.29	65.17	2.22	0.203	0.313	0.303
	Leaves (g)	211.7	204.8	204.6	208.5	205.5	12.84	0.688	0.674	0.688
	Developing fruits (g)**	166.7	168.7	167.6	169.9	165.4	6.67	0.731	0.992	0.859
	Specific leaf area (m ² .kg ⁻¹)	25.1	24.1	22.7	25.9	22.1	2.4	0.703	0.140	0.501
Growth	Total plant length (cm)	327	326	334	328	330	7	0.358	0.726	0.869
	Stem diameter (mm)	11.8	11.7	11.8	11.7	11.9	0.2	0.659	0.172	0.758
	Fifth leaf length (cm)	44.8	42.5	44.0	43.7	43.9	0.8	0.096	0.753	0.778
	Fruit size (g)	247	238	255	241	252	8	0.199	0.136	0.438
	Fruit set (fruit·week ⁻¹)	0.81	0.80	0.80	0.80	0.80	0.02	0.927	0.964	0.682
Fruit load (fruit·plant ⁻¹)	17.9	18.1	17.6	17.6	18.1	0.5	0.701	0.268	0.375	

* Means of n = 12 for source effect, n = 18 for rate effect and n = 6 for source*rate effect.

** Developing fruits are immature fruits collected at the end of the experiment, for the final biomass evaluation.

Table 10. Growth parameters of cucumber plants.

		ANOVA 1*		ANOVA 2**									
		control	<i>p</i> -value	Application rate (%)			Source			SE	<i>p</i> -value***		
		0	trt	50	75	100	inorganic	mixed	organic		source	rate	source*rate
Dry biomass	Stems (g)	73.4	0.534	74.3	71.2	69.4	71.1	70.5	70.3	2.3	0.751	0.272	0.088
	Leaves (g)	54.2	0.214	49.1	50.5	47.6	50.4	48.2	48.6	3.8	0.878	0.749	0.703
	Developing fruits**** (g)	15.9	0.956	25.6	24.4	28.6	26.1	23.2	33.4	5.0	0.255	0.874	0.310
Growth	Fifth leaf length (cm)	24.4	0.553	24.2	24.0	23.7	23.9	24.1	24.0	0.4	0.855	0.330	0.484
	Flowering height	2.2	0.524	2.2	2.2	1.7	1.9	2.0	2.2	0.2	0.582	0.128	0.731
	Stem diameter (mm)	8.2	0.891	8.2	8.1	8.1	8.2	8.2	8.1	0.1	0.416	0.682	0.935
	Total plant length (cm)	1090	0.427	1115	1113	1124	1116	1106	1130	19	0.334	0.746	0.448
	Specific leaf area (m ² .kg ⁻¹)	48	0.163	45	47	48	45	49	48	2	0.350	0.099	0.108

* ANOVA 1 was performed by analyzing the ten treatments of the experiment, including control (n = 30).

** ANOVA 2 was realized by integrating the two factors in the analysis (source and rate) while excluding the control (0%) (n = 27).

*** Means of n = 9 for source effect, n = 9 for rate effect and n = 3 for source*rate effect.

**** Developing fruits are immature fruits collected at the end of the experiment, for the final biomass evaluation.

Yield

For both studied species, tomato and cucumber, the N source and application rate treatments did not significantly affect yield at $p < 0.05$. According to application rates, yield ranged from 1.33 to 1.40 kg m⁻² week⁻¹ for tomato (Table 11) and from 1.52 to 1.56 kg m⁻² week⁻¹ for cucumber (Table 12).

Fruit quality parameters

For both studied species, all fruit quality parameters measured which includes acid ascorbic, phenolic compounds, carotenoids, dry matter, titratable acidity, electrical conductivity, soluble solids, colour, firmness and physiological disorders did not significantly differ according to the nitrogen source and application rate (Tables 11 and 12, Table A1 and Table A2).

Table 11. Yield and fruit quality of tomato plants grown under different N source and application rate treatments.

	Source		Application rate (%)			SE	<i>p-value</i> *		
	organic	inorganic	50	100	150		source	rate	source* rate
Yield (kg·m⁻²·week⁻¹)	1.37	1.37	1.38	1.40	1.33	0.07	0.606	0.892	0.901
Fruit quality									
Soluble solids (°Brix)	3.90	3.80	3.76	3.99	3.85	0.10	0.595	0.095	0.587
Titratable acidity (% citric acid)	0.45	0.45	0.44	0.47	0.46	0.01	0.780	0.375	0.631
Phenolic compounds (mg eq. a. gal·g ⁻¹)	3.15	3.13	3.23	3.06	3.13	0.06	0.751	0.128	0.484
Vitamin C (mg·g ⁻¹)	1.40	1.40	1.98	1.84	1.96	0.12	0.578	0.056	0.717
Total carotenoids (mg·g ⁻¹)	0.31	0.33	0.34	0.30	0.32	0.02	0.488	0.297	0.770

* Means of n = 12 for source effect, n = 18 for rate effect and n = 6 for source*rate effect.

Table 12. Principal quality parameters and yield of cucumber plants.

	ANOVA 1*		ANOVA 2**									
	Contr ol	<i>p</i> - value	Application rate (%)			Source			SE	<i>p</i> -value***		
	0	trt	50	75	100	inorganic	mixed	organic		source	rate	source * rate
Yield (kg·m⁻²·week⁻¹)	1.55	0.618	1.56	1.52	1.54	1.55	1.56	1.50	0.10	0.870	0.736	0.162
Fruit quality												
Soluble solids (°Brix)	3.31	0.375	3.37	3.37	3.40	3.44	3.30	3.40	0.14	0.085	0.835	0.417
Titrateable acidity (% citric acid)	0.078	0.600	0.079	0.080	0.083	0.081	0.081	0.080	0.001	0.961	0.115	0.837
Phenolic compounds (mg eq. a. gal·g ⁻¹)	1.679	0.791	1.82	1.75	1.78	1.76	1.81	1.78	0.08	0.759	0.632	0.751
Vitamin C (mg·g ⁻¹)	0.146	0.537	0.147	0.140	0.145	0.140	0.145	0.147	0.005	0.474	0.391	0.119
Total carotenoids (mg·g ⁻¹)	0.062	0.655	0.059	0.056	0.063	0.059	0.060	0.060	0.002	0.975	0.218	0.587

* ANOVA 1 (one-way ANOVA) was performed by analyzing the ten treatments of the experiment, including the control (n = 30).

** ANOVA 2 (two-way ANOVA) was realized by integrating the two factors at the analysis (source and does) while excluding the control (0%) (n = 27)

*** Means of n = 9 for source effect, n = 9 for rate effect and n = 3 for source*rate effect.

Discussion

Effect of N source and organic N application rate on growing medium parameters

Biological properties of compost are well known to enhance soil fertility in organic agriculture since it increases soil carbon content (Agnew and Leonard, 2003; Ros et al., 2007). In our study, during the tomato experiment, even if all treatments received weekly compost amendments (2.54 kg by experimental unit during the 16 weeks tomato culture) a significant difference was observed for all biological parameters between the organically and inorganically treated growing media. Therefore, the nitrogen source was a determinant variable relative to growing medium biological processes.

For the standard N application rate of 100% of the estimated plant needs, higher values were observed for all growing medium biological variables (growing medium respiration, microbial activity, earthworm biomass and microorganism abundance) in the organically treated growing media compared to the inorganically treated ones, which agreed with our hypothesis. Those observations agree with studies where application of organic nitrogen increased soil respiration in long-term (Liu et al., 2009; Tejada et al., 2006) and short-term (Dinesh et al., 2010) field condition. The authors explained the higher respiration rate by the elevation of metabolizable C following the application of organic amendments. In our experiments, there was no significant difference in growing medium carbon concentration among nitrogen sources or application rates. That may be attributed to the fact that available carbon was consumed by the microorganisms in the organically treated growing media where they were more abundant. In addition, the growing media in our experiments had a high initial carbon content because the organic management included the use of compost. That may have contributed to reducing the difference in terms of carbon content observed between treatments.

Organic N addition showed the same relationship for CO₂ efflux and microbial activity which resulted in an elevation of the growing medium activity with increasing nitrogen application rates (Figure 1). Total nitrogen was significantly higher in organically treated growing media compared to the inorganically treated ones because organic nitrogen amendments were supplied in larger quantities to compensate for their lower mineral N availability. Due to the presence of carbon in organic amendments (C/N ratios of 4.24 and 3.40 for feather meal and blood meal, respectively) there was a correlation between

growing medium soluble nitrogen (N-NO₃) level and the amount of soluble organic carbon (SOC) in organically treated growing media ($r = 0.56$; $p = 0.024$) whereas there was no relationship between N-NO₃ and SOC in the inorganically treated experimental units ($r = -0.09$, $p = 0.729$) (figure 6). Those relationships showed that the addition of easily available carbon contained in the organic nitrogen amendments promoted growing medium microbial decomposition, which is reflected by their metabolic activity. For organic nitrogen source, SOC showed a positive relationship with CO₂ efflux ($r = 0.63$, $p = 0.009$) and for both nitrogen sources, SOC was correlated with growing medium microbial activity ($r = 0.46$, $p = 0.072$ (organic); $r = 0.71$, $p = 0.001$ (inorganic)) The correlation between SOC and CO₂ efflux was not significant for inorganic nitrogen source, possibly because those treatments presented lower values of CO₂ efflux. However, in all cases, the slope between SOC and biological parameters was positive, showing the positive influence of carbon content on the growing media biological properties. Principal component analysis also showed that SOC is contributing to the variation explained by the first component which separates the two nitrogen sources (Figure 4). The higher organic carbon availability in the growing media may then explain the higher CO₂ efflux and microbial activity observed when organic N application rate was increased. Other studies also reported a positive relationship between organic fertilizers and growing medium enzymatic and microbial activity that was related to higher organic carbon availability following an organic fertilization (Dinesh et al., 2010; Kandeler et al., 1999; Liu et al., 2009). The autotrophic respiration differences, through variation of the root biomass of experimental units could also be responsible for CO₂ efflux enhancement in the organic and high application rate treatments.

The decrease in the earthworm biomass at higher application rate (150% N) may be related to a lower pH due to the acidifying effect of nitrogen fertilizers (Table 6). It has been shown that high application rate of mineral fertilizers such as ammonium nitrate (Potter et al., 1985) and ammonium sulfate or sulphur-coated urea (Ma et al., 1990) reduced earthworm abundance in long-term studies on grasslands. Those observations were linked with the growing medium acidity reduction effect of the applied inorganic nitrogen fertilizers. On the other side, long-term application of organic fertilizers such as farmyard manure has shown significant increases in earthworm abundance (Edwards et al., 1982; Estevez et al., 1996; Tiwari et al., 1993). In one of those studies, earthworm biomass tended to decrease at higher application rates (without any details) (Edwards et

al., 1982). In our study, the organic fertilizers may have promoted earthworm abundance by adding labile carbon to the growing media, except at higher application rates as the growing medium pH was much lower. Nevertheless, the high variability between experimental units in the 150% organic treatment makes the interpretation quite difficult, earthworm biomass ranging from 0 to 2.5 g·L⁻¹ in those units. More investigation would be needed to understand the effect of high organic N application rates on the short-term dynamics of the earthworm population.

Earthworms play a significant role according to the nutrient cycling given its close relationship with soil microorganisms and has been found to affect positively soil enzymatic activity (Estevez et al., 1996; Tao et al., 2009). Consequently, their higher presence in the organically treated units may have positively affected the growing medium microbial activity. Those parameters were, however, not correlated, probably due to the high variability between the experimental units and the numerous experimental units without earthworms counted.

Since microbial activity is strongly and positively related to soil CO₂ fluxes, soil respiration being linked to soil microorganism metabolism (Iqbal et al., 2010; Treseder et al., 2008), the higher microbial activity (FDA hydrolysis) observed under the organic nitrogen fertilization compared to the inorganic one could likely be linked to the higher growing medium respiration. Those two parameters showed a significant correlation ($r = 0.65$; $p < 0.001$). It should be noted that there may also be differences in autotrophic respiration that could have contributed to the variations observed in terms of total respiration in addition to microorganism activity (heterotrophic respiration).

The significant difference between microorganism abundance composition suggests that nitrogen source led to a different biological selection that occurred within a relatively short time period (observed after 16 weeks of treatment). For bacteria and eucaryota taxa, individuals are clearly separated along the first axis, and this one accounts for 44% of the variation of bacteria composition while the first axis explained 34% of the variation for eucaryota taxa. Regarding fungi taxa, the individuals are scattered along the horizontal (37%) and vertical axis (33%). Unexpectedly, the bacterial diversity expressed by the Shannon index was higher for the inorganic nitrogen source, while no difference was observed for fungi and eucaryota.

The behaviour shown by biological activity parameters of these growing media are closely related. They underline the fact that the organic nitrogen amendment itself can stimulate microbial activity. In fact, organic matter is a key determinant of soil fertility (Tittarelli et al., 2016). This elevation of microbial activity can be explained by the mineralization potential that was higher when using feather meal and blood meal than ammonium nitrate, creating a favourable environment for decomposition by microorganisms and stimulating their growth (Tejada et al., 2006).

The higher concentration of soluble organic nitrogen in the inorganically treated growing media compared to the organically treated ones may be related to plant-microbe competition for nitrogen, as microorganism abundance was significantly higher in the organically treated growing media. Effectively, interspecific competition for nitrogen has been shown to depend on soil N concentration, plant demand (Kuzyakov and Xu, 2013), spatiotemporal roots and microorganisms distribution and turnover (Hodge et al., 2000).

Effect of inorganic N application rate on growing medium parameters

Relatively to growing medium microbial activity and earthworm biomass, there was no relationship between inorganic N application rate and biological activity compared to the addition of organic N. However, growing medium CO₂ efflux was decreasing linearly with the addition of inorganic N ($p = 0.049$). The size of this effect remains small, but it still agrees with other studies where the application of inorganic nitrogen decreased growing medium respiration in long-term forest conditions (Bowden et al., 2004; Treseder et al., 2008). Those results may also be attributed to the elevation of growing medium nitrogen availability in the inorganic treatments, soluble N-NO₃ and N-NH₄ being higher at higher nitrogen application rate (Table 7) without increasing carbon input. Effectively, according to stoichiometric theory, low nitrogen availability may increase decomposition which in turns increases growing medium respiration (Craine et al., 2007; Melilo and Haber, 1982).

Growth, yield and fruit quality parameters

The growth parameters, the plant biomass and yield were similar between organically and inorganically treated growing media as hypothesized. Organic nitrogen was supplied in higher quantities since its effect of mineralization was taken into account. Then, growing medium available nitrogen forms (nitrate and ammonium) levels (Table 5) were always

sufficient to meet plant demand (140-340 ppm following a SSE extraction (Robitaille and Duval, 2003)) in experimental units of both nitrogen sources treatments (organic, mixed and inorganic). The high biological activity in organically treated growing media was thereby able to provide nutrients needed for plant growth, although lower soluble nitrogen forms concentrations (N-NO₃ and N-NH₄) were observed under organic regime.

Quality attributes did not show any significant differences according to the nitrogen source and the application rate during both experiments (cucumber and tomato), which was in contradiction with our hypothesis. We have hypothesized that fruit quality would be higher with organic nitrogen amendments and lower following higher nitrogen application rates. Even if the biological activity was higher and the inorganic nitrogen forms lower in organically treated growing media, these factors did not impact significantly fruit quality in the present study. The lower soluble nitrogen forms concentrations in the organically treated growing media were not a limiting factor as they were maintained above the required concentrations (Robitaille and Duval, 2003) indicating that there was probably no limitation in terms of nitrogen availability between the different nitrogen sources in both experiments. Lopez et al. (2014) suggested that other factors such as N availability, electrical conductivity and the other nutrients present in the fertilizers may have a stronger impact than the nitrogen source on fruit quality. The similarity in terms of growth and yield between treatments may explain the similarity of fruit quality, given that plants make trade-offs between the allocation of resources for growth and for the synthesis of defence compounds such as phenolic compounds (Stamp, 2003).

Effect of N application rate

The yield similarity among nitrogen application rates was in contradiction with our hypothesis and might be related to growing medium reserves and high volume (around 0.6 m³) which were probably able to partly meet the needs of nutrients during the 8- (cucumber) or 16 weeks (tomato) experimental period. There was a concentration of total nitrogen in the growing medium ranging between 1.9-2.8% before the experiments (Table 2). Also, the nitrate concentration was maintained relatively high in all treatments, for cucumber and tomato experiments and above the required growing medium solution concentrations (Robitaille and Duval, 2003). This could explain the absence of difference observed in terms of yield, growth and fruit quality between treatments. Thus, there was no apparent nitrogen deficiency in the context of our study in the lower nitrogen application

rates. The low level of leaching (<5%) could also explain this observation. Our results agree with other studies where nitrogen application rate (Mazzitelli et al., 2014) and source (Toor et al., 2006) did not significantly affect yield.

Conclusion

Growing medium respiration, CO₂ efflux induced by rhizospheric respiration and microbial respiration (resulting from organic matter decomposition), is a fundamental process regarding the carbon cycle (Luo and Zhou, 2006). Few studies have measured growing medium respiration under greenhouse conditions and within short time intervals. The 88% increase of growing medium respiration in organically treated growing media (at standard application rate of 100%), compared to the inorganic ones, has significant implications, indicating an increase in the metabolic activity of growing medium microorganisms. Growing medium enzymatic activity is directly linked to the catalysis of several key biological reactions, playing a role in the maintenance of soil stability (Dick and Sandor, 1994). Growing medium microbial activity and microorganism abundance (fungi and bacteria) and earthworm biomass showed a positive variation after being fertilized with organic nitrogen compared to inorganic nitrogen fertilization (at standard application rate of 100%). Since there is few information in the literature on the evolution of biological processes such as growing medium respiration, microbial activity and earthworm biomass in a short-term greenhouse experiment in relation with nitrogen fertilizers, this study highlights the principal tendencies demonstrated by these growing medium biological indicators in that particular context. As Canadian organic regulation allows production in containers, it appears important to better understand growing medium dynamics in that kind of growing system.

This study underlined the positive impact of organic nitrogen amendments on biological richness and diversity of the growing medium. The plants fertilized with organic nitrogen maintained the same yield, fruit quality and plant growth than the plants fertilized with inorganic nitrogen. The effect of organic nitrogen on growing medium attributes may in turn affect positively the growing medium quality, stability and fertility. Since organic greenhouse growers are keeping their growing medium for at least five years, it appears important to maintain the biological properties of the growing medium to support a high microbial activity year after year. Considering that nitrogen is often the most limiting nutrient in organic horticulture, a sound management of its use is essential. Those results

contribute to the better understanding of the growing medium mechanisms governing organic vegetable greenhouse cultivation.

Acknowledgments

This work was funded by the Organic Science Cluster II of Agriculture and AgriFood Canada and was conducted in partnership with Les Serres Lefort Inc. We also thank B. Dion, A. Cyr-Wright, P. P. Dion, V. A.-Giroux, D. Sylvain and K. Tchansi for their contribution during greenhouse and laboratory work.

Chapitre 3: Conclusion

Il existe de nombreuses différences entre les modes de culture biologique et conventionnelle rendant ces systèmes distincts à divers égards. À travers une étude visant à isoler l'effet de la nutrition azotée parmi les variables qui différencient les cultures biologiques et conventionnelles, les paramètres agronomiques, nutritionnels et biologiques ont été mis en lumière. La principale observation réalisée lors des expérimentations a été faite à partir des mesures relatives à l'activité biologique du milieu de culture. Tous les paramètres mesurés ont varié dans le même sens; montrant une augmentation de l'activité biologique du milieu de culture en présence d'azote de source organique par rapport à une fertilisation en azote de source inorganique ce qui confirme la première hypothèse de cette étude. Seulement six semaines après la transplantation de la culture de tomate, les traitements issus d'une fertilisation azotée organique présentaient une abondance de champignons et de bactéries supérieure aux traitements fertilisés avec de l'azote inorganique. Cette expérience a permis d'observer que les microorganismes du sol réagissent très vite aux amendements qui sont incorporés et que leur composition (diversité et abondance) est donc très modulable dans le temps.

Concernant la croissance et les rendements, les différentes sources d'azote n'ont pas occasionné de différence significative comme prévu dans l'hypothèse de départ. Toutefois, aucune différence de croissance et de rendement n'a été observée au niveau de la dose d'azote, ce qui est contraire à la deuxième hypothèse de cette étude. Cela peut s'expliquer par les réserves importantes des milieux de culture. En effet, ceux-ci étaient riches en matière organique et présentaient des niveaux élevés en azote alors que les cultures ont été effectuées sur de courtes périodes.

Au niveau de la qualité des fruits (vitamine C, caroténoïdes, composés phénoliques, acidité titrable, contenu en solides solubles, pH, conductivité électrique, désordres physiologiques, calibre, couleur, fermeté), aucune différence significative n'a été observée en fonction de la dose et de la source d'azote étudiées ce qui invalide l'hypothèse émise. Ces résultats sont toutefois conformes avec des études antérieures n'ayant pas observé de différence significative au niveau de qualité nutritive des fruits provenant d'une fertilisation biologique par rapport à une fertilisation conventionnelle. Ils renforcent l'hypothèse selon laquelle la qualité nutritionnelle des fruits cultivés de façon biologique est similaire à celle des fruits cultivés conventionnellement lorsque les plants sont soumis aux

mêmes conditions de culture (stress biotiques et abiotiques). Étant donné que la durabilité d'un système de production est liée à la santé des sols qui le définissent, la fertilisation azotée organique représente un avantage, puisqu'elle stimule l'activité biologique du milieu de culture. Une forte activité microbiologique du sol permet l'optimisation de la minéralisation des éléments nutritifs et donc de la disponibilité des formes d'azote assimilables en plus de maintenir la fertilité du sol à long terme. Une bonne compréhension de la fertilisation azotée et de son impact sur le sol, la croissance et la qualité des fruits sont donc clés dans la perspective d'une saine gestion de la nutrition azotée en serriculture biologique.

Bibliographie

Abbott, J.A., 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*. 15, 207-225.

Abu-Reidah, I. M., Arráez-Román, D., Quirantes-Piné, R., Fernández-Arroyo, S., Segura-Carretero, A., Fernández-Gutiérrez, A. 2012. HPLC-ESI-Q-TOF-MS for a comprehensive characterization of bioactive phenolic compounds in cucumber whole fruit extract. *Food Research International*, 46(1), 108-117.

Agence canadienne d'inspection des aliments, 2011. En ligne [URL] <http://www.inspection.gc.ca/aliments/fruits-et-legumes-frais/inspection-de-la-qualite/manuels-d-inspection-des-legumes-frais/concombres/fra/1303757418571/1303757470588> (Consulté le 04-08-2016).

Agnew, J.M., Leonard, J.J., 2003. The Physical Properties of Compost The Physical Properties of Compost. *Compost Science & Utilization* 11, 238-264.

Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2016. Aperçu statistique de l'industrie des légumes de serre du Canada pour 2015. Section des analyses et des renseignements sur les marchés. Division de l'horticulture et des enjeux pans sectoriels, Ottawa, Canada.

Anthon, G.E., LeStrange, M., Barrett, D.M., 2011. Changes in pH, acids, sugars and other quality parameters during extended vine holding of ripe processing tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91, 1175-1181.

Aoun, B., 2013. Evaluation of fruit quality traits of traditional varieties of tomato (*Solanum lycopersicum*) grown in Tunisia. *African Journal of Food Science* 7, 350-354.

Asami, D.K., Hong, Y.-J., Barrett, D.M., Mitchell, A.E., 2003. Comparison of the total phenolic and ascorbic acid content of freeze-dried and air-dried marionberry, strawberry, and corn grown using conventional, organic, and sustainable agricultural practices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51, 1237-1241.

Auclair, L., Zee, J.A., Karam, A., Rachat, E., 1995. Nutritive value, organoleptic quality and productivity of greenhouse tomatoes in relation to their production methods: organic - conventional - hydroponic. *Science des Aliments* 15, 511-527.

Barrett, D. M., C. Weakley, J.V., Diaz, M., Watnik., 2007. Qualitative and nutritional differences in processing tomatoes grown under commercial organic and conventional production systems. *Journal of Food Science* 72(9): C441-C451.

Battistuzzi G, Bellei M, Bortolotti, C.A., Rocco, G.D., Leonardi, A. et Sola, M. 2004. Characterization of the solution reactivity of a basic heme peroxidase from *Cucumis sativus*. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 15;423(2), 317-31.

Bazzano, L.A., He, J., Ogden, L.G., Loria, C.M., Vupputuri, S., Myers, L., Whelton, P.K., 2002. Fruit and vegetable intake and risk of cardiovascular disease in US adults the first National Health and Nutrition Examination Survey Epidemiologic Follow-up Study 1 - 3. *The American Journal of Clinical Nutrition* 76, 93-99.

- Benard, C., Gauthier, H., Bourgaud, F., Grasseley, D., Navez, B., Caris-Veyrat, C., Weiss, M., Génard, M., 2009. Effects of Low Nitrogen Supply on Tomato (*Solanum lycopersicum*) Fruit yield and quality with special emphasis on sugars, acids, ascorbate, carotenoids, and phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57, 4112-4123.
- Boizot, N., Charpentier, J., 2006. Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. Méthodes et outils pour l'observation et l'évaluation des milieux forestiers, prairiaux et aquatiques. 79-82.
- Borguini, R.G., da Silva, M.V., 2007. Nutrient contents of tomatoes from organic and conventional cultivation. *Alimentos Nutricao* 21, 41-46.
- Bouraoui, F., Grizzetti, B., 2014. Modelling mitigation options to reduce diffuse nitrogen water pollution from agriculture. *Science of the Total Environment*. 468-469, 1267-1277.
- Brajeul, E., Javoy, M., Pelletier, B., Letard, M., 2001. Le concombre. CTIFL, Paris, France.
- Brennstuhl, M-J., 2018. Alimentation Santé : de l'intestin au régime méditerranéen, toute l'alimentation santé expliquée. Éditions Dunod, Paris, France.
- Bryant, J.P., Chapin, F.S., Klein, D.R., 1983. Carbon/nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. *OIKOS* 40, 357-368.
- California Tomato Commission, 2002. Guide to Ripening Stages [WWW Document]. URL <http://lagorio.com/assets/pdf/lagorio-tomato-guide.pdf> (Accessed on 04-20-2017).
- Caliman, F.R.B., da Silva, D.J.H., Stringheta, C.P., Fontes, P.C.R., Moreira, G.R., Mantovani, E.C., 2010. Quality of tomatoes grown under a protected environment and field conditions. *Idesia* 28, 75-82.
- Camargo, J.A., Alonso, Á., 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems A global assessment . *Environmental International* 32, 831-849.
- Camelo, L., Gómez, P.A., 2004. Comparison of colour indexes for tomato ripening. *Horticultura Brasileira* 22, 534-537.
- Caporaso, J. G., Kuczynski, J., Stombaugh, J., Bittinger, K., Bushman, F. D., Costello, E. K., Fierer, N., Gonzalez Peña, A., Goodrich, J.K., Gordon, J.I., Huttley, G.A., Kelley, S.T., Knights, D., Koenig, J.E., Ley, R.E., Lozupone, C.A., McDonald, D., Muegge, B.D., Pirrung, M., Reeder, J., Sevinsky, J.R., Turnbaugh, T.J., Walters, W.A., Widmann, J., Yatsunencko, T., Zaneveld, J., Knight, R. 2010. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nature Methods*, 7(5), 335-6.
- Caris-Veyrat, C., Amiot, M.J., Tyssandier, V., Grasselly, D., Buret, M., Mikolajczak, M., Guillard, J.-C., Bouteloup-Demange, C., Borel, P., 2004. Influence of Organic versus Conventional Agricultural Practice on the Antioxidant Microconstituent Content of Tomatoes and Derived Purees; Consequences on Antioxidant Plasma Status in Humans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52, 6503-6509.

Cassman, K.G., Munns, D.N., 1980. Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature, and depth. *Soil Science Society of America Journal*, 44(6), 1233-1237.

Chassy, A.W., Bui, L., Renaud, E.N.C., Horn, M. V, Mitchell, A.E., 2006. Three-year comparison of the content of antioxidant microconstituents and several quality characteristics in organic and conventionally managed tomatoes and bell peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54, 8244-8252.

Clapperton, J. 1996. *National Sampling Protocols*. Agriculture et Agroalimentaire Canada, University of Lethbridge.

Clinton, S.K., 1998. Lycopene: chemistry, biology, and implications for human health and disease. *Nutrition Reviews* 56, 35-51.

CRAAQ, 2010. *Guide de référence en fertilisation*. 2^e édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Québec, Canada.

Combs Jr, G. F., & McClung, J. P. 2016. *The vitamins: fundamental aspects in nutrition and health*. First Edition. Academic press, London, United Kingdom.

Comeau, A. M., Li, W. K., Tremblay, J. É., Carmack, E. C., Lovejoy, C. 2011. Arctic Ocean microbial community structure before and after the 2007 record sea ice minimum. *PLoS One*, 6(11), e27492.

Craine, J.M., Morrow, C., Fierer, N., 2007. Microbial nitrogen limitation increases decomposition. *Ecology* 88, 2105-2113.

Davies, J.N., Hobson, G.E. 1981. The constituents of tomato fruit - the influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 15, 205-280.

de Candolle, A., 1883. *Origine des plantes cultivées*. Vol. 43. G. Librairie Germer Baillière et Cie, Paris, France.

D'Evoli, L., Lombardi-Boccia, G., Lucarini, M., 2013. Influence of heat treatments on carotenoid content of cherry tomatoes. *Foods* 2, 352-363. doi:10.3390/foods2030352

Dannehl, D., Huber, C., Rocksch, T., Huyskens-Keil, S., Schmidt, U., 2012. Interactions between changing climate conditions in a semi-closed greenhouse and plant development, fruit yield, and health-promoting plant compounds of tomatoes. *Scientia Horticulturae* 138, 235-243. doi:10.1016/j.scienta.2012.02.022

Dannehl, D., Josuttis, M., Huyskens-Keil, S., Ulrichs, C., Schmidt, U., 2014. Comparison of different greenhouse systems and their impacts on plant responses of tomatoes. *Gesunde Pflanz.* 66, 111-119. doi:10.1007/s10343-014-0322-0

De Oliveira, F.D.A.D., Duarte, S.N., Medeiros, J.F., Aroucha, E.M.M., Dias, N.D.S., 2015. Quality in the pepper under different fertigation managements and levels of nitrogen and potassium. *Rev. Ciência Agrônômica* 46, 764-773. doi:10.5935/1806-6690.20150064

Del Amor, F.M., 2007. Yield and fruit quality response of sweet pepper to organic and mineral fertilization. *Renewable Agriculture and Food Systems* 22, 233-238. doi:10.1017/S1742170507001792

Desjardins, Y., 2016. Are organically grown fruits and vegetables nutritionally better than conventional ones? Revisiting the question with new eyes. *Acta Horticulturae* 1137, 187-200. doi:10.17660/ActaHortic.2016.1137.27

Diacono, M., Montemurro, F., 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 401-422.

Dick, R.P., Sandor, J.A., Eash, N.S. 1994. Soil enzyme activities after 1500 years of terrace agriculture in the Colca Valley, Peru. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 50(2), 123-131.

Dinesh, R., Srinivasan, V., Hamza, S., Manjusha, A., 2010. Bioresource Technology Short-term incorporation of organic manures and biofertilizers influences biochemical and microbial characteristics of soils under an annual crop [Turmeric (*Curcuma longa* L.)]. *Bioresource Technology* 101, 4697-4702. doi:10.1016/j.biortech.2010.01.108

Dorais, M., 2001. Qualité de la tomate de serre, CRAAQ, Québec, Canada.

Dorais, M., Alsanius, B., 2015. Advances and trends in organic fruit and vegetable farming research, in: Janick, J. (Ed.), *Horticultural Reviews*. John Wiley & Sons, Inc., pp. 185-267.

Downing, J.A., Baker, J.L., Diaz, R.J., Prato, T., Rabalais, N.N., Zimmerman, R.J., 1999. Gulf of Mexico Hypoxia: Land and Sea Interactions Council for Agricultural Science and Technology. Council for Agricultural Science and Technology Task Force Report.

Dorais, M. et Schwarz, D. 2018. Organic tomato. In: *Tomato*. 2nd edition. Crop Production Science in Horticulture Series. E. Heuvelink Ed. CAB International. Wallingford, Oxon, United Kingdom.

Dumas, Y., Dadomo, M., Lucca, G. Di, Grolier, P., 2003. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes *Science of Food and Agriculture* 382, 369-382. doi:10.1002/jsfa.1370

Dumas, Y., Leoni, C., Portas, C.A.M., Bièche, B., 1994. Influence of water and nitrogen availability on yield and quality of processing tomato in the European Union countries. *Acta Horticulturae* 376, 185-192.

Edwards, C.A., & Loft, J.R., 1982. Nitrogenous fertilizers and earthworm populations in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 14(5), 515-521.

Eifediyi, E.K., & Remison, S.U., 2010. Growth and yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.) as influenced by farmyard manure and inorganic fertilizer. *Journal of Plant Breeding and Crop Science* 2(7), 216-220.

Estevez, B., N'Dayegamiye, A., & Coderre, D. 1996. The effect on earthworm abundance and selected soil properties after 14 years of solid cattle manure and NPKMg fertilizer application. *Canadian Journal of Soil Science* 76(3), 351-355.

Farndon, J., 1999. Nitrogen. Marshall Cavendish Corporation, New York.

Feijuan, W., Cheng, Z., 2012. Effects of nitrogen and light intensity on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) production under soil water control. *African Journal of Agricultural Research*, 7, 4408-4415.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT. 2014. En ligne [URL] <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (Consulté le 02-08-2017).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)., 2013. Current world fertilizer trends and outlook to 2015; Rome, Italie.

Frusciante, L., Carli, P., Ercolano, M.R., Pernice, R., Di Matteo, A., Fogliano, V., Pellegrini, N., 2007. Antioxidant nutritional quality of tomato. *Molecular Nutrition & Food Research* 51, 609-17. doi:10.1002/mnfr.200600158

Génard, M., Robin, C., Gautier, H., Massot, C., Bénard, C., Labat, R., Bertin, N., J, L.B., Adamowicz, S., Bourgaud, F., Les, V., Cedex, N., 2010. Élaboration de la qualité du fruit: composition en métabolites primaires et secondaires. *Innovations Agronomiques* 9, 47-57.

Gouvernement du Canada. 2015. Norme nationale du Canada. Systèmes de production biologiques - Principes généraux et normes de gestion (CAN/CGSB-32.310). Conseil canadien des normes, Ottawa, Canada.

Gouvernement du Canada. 2015. Norme nationale du Canada. Systèmes de production biologiques - Liste des substances permises (CAN/CGSB-32.311). Conseil canadien des normes, Ottawa, Canada.

Hallmann, E., Rembalkowska, E., 2007. Estimation of fruits quality of selected tomato cultivars (*Lycopersicon esculentum* Mill) from organic and conventional cultivation with special consideration of bioactive compounds content. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 52(3), 55-60.

Harada, T., Takaki, H., Yamada, Y., 1968. Effect of nitrogen sources on the chemical components in young plants. *Soil Science and Plant Nutrition* 14(2), 47-55.

Hatfield, J.L., Follett, R.F. 2008. Second Edition. Nitrogen in the environment: Sources, problems, and management. Elsevier, San Diego, United States, 443-462.

Hatfield, J. L., Prueger, J. H. 2004. September. Nitrogen over-use, under-use, and efficiency. In *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress* (Vol. 26).

Hedges, L. J. et Lister, C. E. 2005. Nutritional attributes of salad vegetables. *Croop and Food Research Confidential Report No 1473*. New Zealand Institute for Crop & Food Research.

Hercberg S., Preziosi P., Briançon S., Galan P., Triol I., Malvy D., Roussel A.M., Favier A. 1998. A primary prevention trial using nutritional doses of antioxidant vitamins and minerals in cardiovascular diseases and cancers in a general population: the SU.VI.MAX study - design, methods, and participant characteristics, *Controlled Clinical Trials* 19(4), 336-51.

Hernandez, T., Chocano, C., Moreno, J., García, C., 2014. Towards a more sustainable fertilization : Combined use of compost and inorganic fertilization for tomato cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 196, 178-184. doi:10.1016/j.agee.2014.07.006

Herraiz, F.J., Raigón, M.D., Vilanova, S., García-martínez, M.D., Gramazio, P., Plazas, M., Rodríguez-burruezo, A., Prohens, J., 2016. Fruit composition diversity in land races and modern pepino (*Solanum muricatum*) varieties and wild related species. *Food Chemistry* 203, 49-58. doi:10.1016/j.foodchem.2016.02.035

Heuer, B., 1991. Growth, photosynthesis and protein content in cucumber plants as affected by supplied nitrogen form. *Journal of Plant Nutrition* 14(4), 363-373.

Heuvelink, E., 1997. Effect of fruit load on dry matter partitioning in tomato. *Scientia Horticulturae* 69, 51-59.

Heuvelink, E., 1995. Effect of plant density on biomass allocation to the fruits in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Horticulturae* 64, 193-201.

Heuvelink, E., Dorais, M., 2005. Crop growth and yield, in: *Tomatoes*. CABI Publishing, Wageningen.

Hodge, A., Robinson, D., Fitter, A., 2000. Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen? *Trends in Plant Science*, 5(7), 304-308.

Hsu, A.Y., Shen, T., Hwang, S., Hsu, Y., Shen, T., 2009., Soil Fertility Management and Pest Responses A Comparison of Organic and Synthetic Fertilization Soil Fertility Management and Pest Responses: A Comparison of Organic and Synthetic Fertilization. *Journal of Economic Entomology* 102, 160-169. doi:10.1603/029.102.0123

IFOAM, Bonn, Germany. Online. [URL] <https://www.ifoam.bio/fr/organic-landmarks/definition-organic-agriculture>. (Accessed on December 17th 2017).

Inselsbacher, E., Wanek, W., Ripka, K., Hackl, E., Sessitsch, A., Strauss, J., Zechmeister-boltenstern, S., 2011. Greenhouse gas fluxes respond to different N fertilizer types due to altered plant-soil-microbe interactions *Plant and Soil*, 343, 17-35. doi:10.1007/s11104-010-0597-6

Isaac, R., A., Johnson, W., C. 1976. Johnson Determination of total nitrogen in plant tissue, using a block digester. *Journal of Association of Official Analytical Chemists* 59: 98-100.

Islam, S., Matsui, T., Yoshida, Y., 1996. Effect of carbon dioxide enrichment on physico-chemical and enzymatic changes in tomato fruits at various stages of maturity. *Scientia Horticulturae* 65, 137-149.

Jackman, R.L., Marangoni, A.G., Stanley, D.W., 1990. Measurement of Tomato Fruit Firmness. *Horticultural Science* 25, 781-787.

Jones Jr, J.B., 2007. *Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden.* CRC press, Boca Raton.

Jorge, M.F., Oliveira, K.D.E., Nascimento, D.O., Ivone, M., Jacintho, M., 2017. Physicochemical characteristics, antioxidant capacity and phenolic compounds of tomatoes fertigated with different nitrogen rates. *Revista Caatinga* 30, 237-243. doi:10.1590/1983-21252017v30n126rc

Kandeler, E., Stemmer, M., Klimanek, E., 1999. Response of soil microbial biomass, urease and xylanase within particle size fractions to long-term soil management. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 261-273.

Kätterer, T., Reichstein, M., Andrén, O. and Lomander, A., 1998. Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models. *Biology and Fertility of Soils* 27(3), 258-262.

Kaur, C., Kapoor, H.C., 2002. Anti-oxidant activity and total phenolic content of some Asian vegetables. *International Journal of Food Science & Technology* 37, 153-161. doi:10.1046/j.1365-2621.2002.00552.x

Koh, W., Yuan, J., Wang, R., Lee, Y., Lee, B., Yu, M.C., Ong, C., 2011. Plasma carotenoids and risk of acute myocardial infarction in the singapore chinese health study. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases* 21, 685-690. doi:10.1016/j.numecd.2009.12.005

Kõljalg, U., Nilsson, R. H., Abarenkov, K., Tedersoo, L., Taylor, A. F., Bahram, M., Bates, S.T., Bruns, T.D., Bengtsson-Palme, J., Callaghan, T.M., Douglas, B., Drenkhan, T., Eberhardt, U., Dueñas, M., Grebenc, T., Griffith, G.W., Hartmann, M., Kirk, P.M., Kohout, P., Larsson, E., Lindahl, B.D., Lücking, R., Martín, M.P., Matheny, P.B., Nguyen, N.H., Niskanen, T., Oja, J., Peay, K.G., Peintner, U., Peterson, M., Põldmaa, K., Saag, L., Saar, I., Schüßler, A., Scott, J.A., Senés, C., Smith, M.E., Suija, A., Taylor, D.L., Telleria, M.T., Weiss, M., Larsson, K-H., 2013. Towards a unified paradigm for sequence-based identification of fungi. *Molecular Ecology*, 22(21), 5271-5277.

Kotake-Nara, E., Kushiro, M., Zhang, H., Sugawara, T., Miyashita, K., Nagao, A., 2001. Carotenoids affect proliferation of human prostate cancer cells. *The Journal of Nutrition* 131, 3303-3306.

Kross, B.C., Ayebo, A.D., Fuortes, L.J., 1992. Methemoglobinemia: Nitrate toxicity in rural America. *American Family Physician Journal* 46(1),183-188.

Kumar, R., Klein, D., Krumbein, A., Köpke, U., Crops, V., Parmar, Y.S., 2007. Product quality of greenhouse tomatoes: Effect of cultivars, organic N-fertilization and harvest time. *European Journal of Horticultural Science* 72, 46-51.

Kuzyakov, Y., Xu, X., 2013. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance. *New Phytologist* 198(3), 656-669.

Lairon, D., 2010. Nutritional quality and safety of organic food. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30:33-41.

Lambert, L., Turcotte, G., Painchaud, J. et Lapalme, J., 2003., Méthodologie pour la prise de données Tom'pousse. Réseau d'avertissements phytosanitaires 1, 1-3.

Lassaletta, L., Billen, G., Garnier, J., Bouwman, L., Velazquez, E., Mueller, N. D., Gerber, J.S., 2016. Nitrogen use in the global food system: past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand. *Environmental Research Letters* 11(9), 095007.

Leonardi, C., Guichard, S., Bertin, N., 2000. High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. *Scientia Horticulturae* 84, 285-296. doi:10.1016/S0304-4238(99)00127-2

Li, M., Ma, F., Shang, P., Zhang, M., Hou, C., Liang, D., 2009. Influence of light on ascorbate formation and metabolism in apple fruits. *Planta* 230, 39-51. doi:10.1007/s00425-009-0925-3

Liu, M., Hu, F., Chen, X., Huang, Q., Jiao, J., Zhang, B., Li, H., 2009. Organic amendments with reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field: the influence of quantity, type and application time of organic amendments. *Applied Soil Ecology* 42(2), 166-175.

Liu, C.W., Sung, Y., Chen, B.C., Lai, H.Y., 2014. Effects of nitrogen fertilizers on the growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11(4), 4427-4440.

Luo, Y., Zhou, X., 2006. Soil respiration and the environment. Academic Press, London.

Ma, W.C., Brussaard, L., & De Ridder, J.A., 1990. Long-term effects of nitrogenous fertilizers on grassland earthworms (Oligochaeta: Lumbricidae): their relation to soil acidification. *Agriculture, ecosystems & environment* 30(1-2), 71-80.

Mahmoud, E., El-Kader, N. A., Robin, P., Akkal-Corfini, N., El-Rahman, L.A., 2009. Effects of different organic and inorganic fertilizers on cucumber yield and some soil properties. *World Journal of Agricultural Sciences* 5(4), 408-414.

Mamatha, H., Srinivasa Rao, N.K., Laxman, R.H., Shivashankara, K.S., Bhatt, R.M., Pavithra, K.C., 2014. Impact of elevated CO₂ on growth, physiology, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) cv. Arka Ashish. *Photosynthetica* 52, 519-528. doi:10.1007/s11099-014-0059-0.

MAPAQ, 2016. Profil sectoriel de l'industrie horticole au Québec. Institut de la statistique du Québec et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), Québec.

Mazzitelli, J.B., Vercambre, G., Sérino, S., 2014. Substantial reduction of water and nitrogen supply does not negatively affect quality or yield of organically grown tomatoes. *Acta Horticulturae* 1041, 103-108.

Meier, M.S., Stoessel, F., Jungbluth, N., Juraske, R., Schader, C., Stolze, M., 2015. Environmental impacts of organic and conventional agricultural products e Are the differences captured by life cycle assessment? *Journal of Environmental Management* 149, 193-208. doi:10.1016/j.jenvman.2014.10.006

Mexicanus, C., Kimura, M., Dhondt, A.A., Lovette, I.J., Dhondt, A., 2006. Phylogeographic structuring of *Plasmodium* lineages across the North American range of the house finch (*Carpodacus mexicanus*). *Journal of Parasitology* 92, 1043-1049.

Morganelli, A., 2007. *The Biography of Tomatoes*. Crabtree Publishing Company, Saint Catharines.

McGuire, K. L., Payne, S. G., Palmer, M. I., Gillikin, C. M., Keefe, D., Kim, S. J., Gedalovich, S.M., Discenza, J., Rangamannar, R., Koshner, J.A., Massmann, A.L., Orazi, G., Essene, A., Leff, J.W., Fierer, N., 2013. Digging the New York City skyline: soil fungal communities in green roofs and city parks. *PLoS One*, 8(3), e58020.

Mitchell, A.E., Hong, Y.-J., Koh, E., Barrett, D.M., Bryant, D.E., Denison, R.F., Kaffka, S., 2007. Ten-year comparison of the influence of organic and conventional crop management practices on the content of flavonoids in tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55, 6154-6159. doi:10.1021/jf070344+

Moiser, A. R., 2008. Exchange of gaseous nitrogen compounds between terrestrial systems and the atmosphere. *Nitrogen in the environment: Sources, problems, and management*. Elsevier, San Diego, CA, 443-462.

Montagu, K.D., Goh, K.M., 1990. Effects of forms and rates of organic and inorganic nitrogen fertilisers on the yield and some quality indices of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Miller). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 18, 21-37. doi:10.1080/01140671.1990.10428067

Mortensen, L.M., 2000. Effects of air humidity on growth, flowering, keeping quality and water relations of four short-day greenhouse species. *Scientia Horticulturae* 86, 299-310.

N'Dayegamiye, A., 2007. La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO: facteur climatique et régions agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote, in: *CRAAQ* (Ed.), Drummundville, pp. 1-12.

Näsholm, T., Kielland, K., Ganeteg, U., 2009. Uptake of organic nitrogen by plants. *New Phytologist* 182, 31-48. doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02751.x

Nkonge, C., Ballance, G.M., 1982. A sensitive colorimetric procedure for nitrogen determination in micro-Kjeldahl digests. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 30, 416-420.

Nosengo, N., 2003. Fertilized to death. *Nature* 425, 894-895.

Nour, V., Trandafir, I., Ionica, M.E., 2013. Antioxidant Compounds , Mineral Content and Antioxidant Activity of Several Tomato Cultivars Grown in Southwestern Romania. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici* 41, 136-142.

Ochoa-Velasco, C.E., Valadez-blanco, R., Salas-coronado, R., Sustaita-rivera, F., Hernández-carlos, B., García-ortega, S., Santos-sánchez, N.F., 2016. Effect of nitrogen fertilization and *Bacillus licheniformis* biofertilizer addition on the antioxidants compounds and antioxidant activity of greenhouse cultivated tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L . var . Sheva). *Scientia Horticulturae* 201, 338-345.

Olle, M., Viršilė, A., 2013. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science* 22, 223-234.

Parisi, M., Giordano, I., Pentangelo, A., Onofrio, B.D., 2006. Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Yield and Fruit Quality in Processing Tomato. In *International Symposium Towards Ecologically Sound Fertilisation Strategies for Field Vegetable Production*, 129-132.

Pascale, S. De, Maggio, A., Orsini, F., Barbieri, G., 2016. Cultivar , soil type , nitrogen source and irrigation regime as quality determinants of organically grown tomatoes. *Scientia Horticulturae* 199, 88-94. doi:10.1016/j.scienta.2015.12.037

Pepin, S., Fortier, É., Béchard-Dubé, S.-A., Dorais, M., Ménard, C., Bacon, R., 2014. Beneficial effects of using a 3-D LED interlighting system for organic greenhouse tomato grown in Canada under low natural light conditions. *Acta Horticulturae* 1041, 239-246.

Poiroux-Gonord, F., Bidel, L. P., Fanciullino, A. L., Gautier, H., Lauri-Lopez, F., Urban, L. 2010. Health benefits of vitamins and secondary metabolites of fruits and vegetables and prospects to increase their concentrations by agronomic approaches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(23), 12065-12082.

Porto, J.S., Nair, T., Rebouças, H., Olimpia, M., Moraes, B., 2016. Quality and antioxydant activity of tomato cultivated under different sources and doses of nitrogen. *Revista Caatinga* 29(4), 780-788. doi:10.1590/1983-21252016v29n401rc

Potter, D. A., Bridges, B. L., Gordon, F. C., 1985. Effect of N fertilization on earthworm and microarthropod populations in Kentucky bluegrass turf. *Agronomy Journal*, 77(3), 367-372.

Potter, P., Ramankutty, N., Bennett, E. M., Donner, S. D. 2010. Characterizing the spatial patterns of global fertilizer application and manure production. *Earth Interactions*, 14(2), 1-22.

Premuzic, Z., Bargiela, M., Garcia, M., Rendina, A., Iorio, A., 1998. Calcium, iron, potassium, phosphorus and vitamin C content of organic and hydroponic tomatoes. *Horticultural Science* 33, 253-257.

Qi, H., Tianlai, L., Xuan, Z., Hongdan, F., 2005. Effects of different nitrogen and potassium levels on yield , quality and sucrose metabolism of tomato. *Chinese Agricultural Science Bulletin* 21, 251-255.

Quast, C., Priesse, E., Yilmaz, P., Gerken, J., Schweer, T., Yarza, P., Peplies, J., Glöckner, F.O. 2012. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools. *Nucleic Acids Research*, 41(D1), D590-D596.

Raffo, A., Leonardi, C., Fogliano, V., Ambrosino, P., Salucci, M., Gennaro, L., Bugianesi, R., Giuffrida, F., Quaglia, G., 2002. Nutritional value of cherry tomatoes (*Lycopersicon esculentum* cv. Naomi F1) harvested at different ripening stages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 6550-6556.

Raiola, A., Rigano, M.M., Calafiore, R., Frusciante, L., Barone, A., 2014. Enhancing the health-promoting effects of tomato fruit for biofortified food. *Mediators of Inflammation* 2014, 2-15.

Rao, A.V., Agarwal, S., 2000. Role of antioxidant lycopene in cancer and heart. *J. Am. Coll. Nutr.* 19, 563-569.

Rebouças, T.N.H., Porto, J.S., Jesus, J.S., Moraes, M.O.B., 2015. Effects of different nitrogen sources and levels on tomato fruit quality. *Acta Horticulturae* 1106, 79-84.

Reidinger, S., Michael H. Ramsey, M.H., Hartley, S.E., 2012. Rapid and accurate analyses of silicon and phosphorus in plants using a portable X-ray fluorescence spectrometer, *New Phytologist* 195(3):699-706.

Rembiałkowska, E., 2007. Quality of plant products from organic agriculture. *Science of Food and Agriculture*, 87, 2757-2762.

Ripoll, J., Urban, L., Staudt, M., Lopez-Lauri, F., Bidel, L. P., Bertin, N., 2014. Water shortage and quality of fleshy fruits—making the most of the unavoidable. *Journal of Experimental Botany*, 65(15), 4097-4117.

Robitaille, R. et Duval, J., 2003. Le point sur la fertilisation en production biologique de la tomate de serre. *MAPAQ. Québec*.

Ros, M., Garci, C., Hernandez, M.T., 2007. Evaluation of different pig slurry composts as fertilizer of horticultural crops Effects on selected chemical and microbial properties. *Renewable Agriculture and Food Systems* 22, 307-315.

Santiago-lópez, G., Preciado-rangel, P., Sánchez-chavez, E., Esparza-rivera, J.R., 2016. Organic nutrient solutions in production and antioxidant capacity of cucumber fruits. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 28, 518-521.

SAS Institute, Inc., 2001. The SAS system for Windows. Release 8.02. SAS Institute, Inc., Cary, NC.

Sbih, M., Dayegamiye, A.N., Karam, A., 2003. Evaluation of carbon and nitrogen mineralization rates in meadow soils from dairy farms under transit to biological cropping systems. *Canadian Journal of Soil Science*, 2003, 83(1), 25-33.

Smil, V., 2001. Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production. MIT press. Cambridge, United States.

Smith-Spangler, C., Brandeau, M.L., Hunter, G.E., Bavinger, J.C., Pearson, M., Eschbach, P.J., Sundaram, V., Liu, H., Schirmer, P., Stave, C., 2012. Are organic foods safer or healthier than conventional alternatives? *Annals of Internal Medicine* 157(5), 348-370.

Sonneveld, C., Voogt, W., 2009. Nutrient management in substrate systems. In *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer Netherlands, pp 277-312.

US National Research Council., 1995. Nitrate and nitrite in drinking water. National Academies Press, Washington, DC, <https://doi.org/10.17226/9038>.

Spiertz, J.H.J., De Vos, N.M., 1983. Agronomical and physiological aspects of the role of nitrogen in yield formation of cereals. *Plant Soil* 75, 379-391.

Stamp, N., 2003. Out of the quagmire of plant defence hypotheses. *The University of Chicago Press* 78, 23-55.

Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J.L., Hernandez, M.T., 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 1413-1421.

Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W.H., Simberloff, D., Swackhamer, D., 2001. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 292(5515), 281-284.

Tittarelli, F., Båth B., Ceglie, F.G., Garcia, M.C., Möller, K., Reents, H.J., Védie, H., Voogt, W., 2016. Soil fertility management in organic greenhouses in Europe. *BioGreenhouse COST Action FA 1105*, www.biogreenhouse.org.

Tiwari, S. C., 1993. Effects of organic manure and NPK fertilization on earthworm activity in an Oxisol. *Biology and fertility of soils*, 16(4), 293-295.

Toor, R.K., Savage, G.P., Heeb, A., 2006. Influence of different types of fertilisers on the major antioxidant components of tomatoes. *Journal of Food Composition and Analysis* 19, 20-27.

Turcotte, G., 2008. Tableau de compilation des données culturales. Rayonnement solaire global hebdomadaire et mensuel. Une période difficile pour la qualité de la tomate. *Tom'Pousse* 1-5.

United States Environmental Protection Agency, 2017. Estimated Nitrate Concentrations in Groundwater Used for Drinking. [En ligne] URL: <https://www.epa.gov/nutrient-policy-data/estimated-nitrate-concentrations-groundwater-used-drinking> (Accessed on 04-05-2017).

Vitousek, P.M, Aber, J.D., Howarth, R.M., Likens, G.E., Watson, P.A., Schindler, D.W., Schlesinger, W.H., Tilman, D.W. 1997. Humal alterations of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications* 7: 737-750.

Voogt, W., Van Winkel, A., Enthoven, N., 2014. Crop response and nitrogen losses as mineral-N target value for organic greenhouse tomato, in: Cordovil, C. (Ed.), 18th Nitrogen Workshop: The Nitrogen Challenge: Building a Blueprint for Nitrogen Use Efficiency and Food Security. Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Lisbon, pp. 233-234.

Voogt, W., de Visser, P. H. E., van Winkel, A., Cuijpers, W. J. M., Van de Burgt, G. J. H. M. 2011. Nutrient management in organic greenhouse production: navigation between constraints. In I International Conference on Organic Greenhouse Horticulture 915, 75-82.

von Liebig, J. 1862. Les lois naturelles de l'agriculture: Traduit d'après la dernière édition Allemande par Ad. Scheler. Vol. 1. Librairie Polytechnique.

Venter, F., 1977. Solar radiation and vitamin C content of tomato fruits. *Acta Horticulturae* 58, 121-127.

Wang, S.Y., Bunce, J.A., Maas, J.L., 2003. Elevated carbon dioxide increases contents of antioxidant compounds in field-grown strawberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51, 4315-4320.

Wang, Y., Huang, S., Liu, R., Jin, J., 2007. Effects of nitrogen application on flavor compounds of cherry tomato fruits. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170(4), 461-468.

Weibel, F.P., Bickel, R., Leuthold, S., Alföldi, T., 2000. Are organically grown apples tastier and healthier? A comparative field study using conventional and alternative methods to measure fruit quality. *Acta Horticulturae* 517, 417-426.

Willer, H., Lernoud, J., 2017. FiBL Survey on Organic Agriculture Worldwide - Metadata, in: *The World of Organic Agriculture-Statistics and Emerging Trends*. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL) and IFOAM-Organics International, Frick and Bonn, pp. 296-306.

Worthington, V., 2001. Nutritional quality of organic versus conventional fruits, vegetables, and grains. *Journal of Alternative and Complementary Medicine* 7, 161-173.

Yara US, Crop Nutrition. Managing tomato taste. [En ligne] URL: <http://www.yara.us/agriculture/crops/tomato/quality/managing-tomato-taste/> (Consulté le 16-07-2017)

Zeithaml, V.A., 1988. Consumer perceptions of price, quality, and value: a means-end model and synthesis of evidence. *Journal of Marketing*. 52, 2-22.

Zushi, K., Matsuzoe, N., 2011. *Scientia Horticulturae* Utilization of correlation network analysis to identify differences in sensory attributes and organoleptic compositions of tomato cultivars grown under salt stress. *Scientia Horticulturae* 129, 18-26.

Annexes

Tableau 1. Moyennes des teneurs en différents métabolites secondaires des fruits de tomate des trois premières grappes récoltées.

(mg·g ⁻¹)	inorganique			organique			Erreur type	source	<i>p-value</i> *	
	50	100	150	50	100	150			dose	source*dose
lutéine	0.0069	0.0068	0.0064	0.0074	0.0069	0.0072	0.0004	0.120	0.505	0.537
α-carotène	0.0099	0.0089	0.0093	0.0096	0.0090	0.0096	0.0005	0.824	0.187	0.738
trans-β-carotène	0.0477	0.0431	0.0421	0.0494	0.0475	0.0480	0.0027	0.055	0.294	0.699
cis-β-carotène	0.0059	0.0053	0.0054	0.0058	0.0054	0.0057	0.0003	0.708	0.193	0.876
13-cis-lycopène	0.0348	0.0308	0.0311	0.0307	0.0333	0.0341	0.0026	0.817	0.955	0.266
9-cis-lycopène	0.0079	0.0070	0.0072	0.0075	0.0074	0.0075	0.0005	0.800	0.526	0.677
trans-lycopène	0.2341	0.1868	0.2071	0.2311	0.2099	0.2160	0.0224	0.574	0.262	0.818
caroténoïdes totaux	0.3471	0.2888	0.3085	0.3415	0.3194	0.3282	0.0279	0.488	0.297	0.770
vitamine C	1.9793	1.8778	1.9552	1.9732	1.7924	1.962	0.1208	0.578	0.056	0.717
phénols totaux	3.2904	3.0468	3.1149	3.1598	3.0774	3.1531	0.0927	0.751	0.128	0.484

* Les moyennes sont issues d'échantillons ayant une taille de n = 12 pour l'effet source, de n = 18 pour l'effet dose et de n = 6 pour l'effet source*dose.

Tableau 2. Moyennes des teneurs en différents métabolites secondaires des fruits de concombre durant trois semaines de récolte.

(mg/g)	ANOVA 1*		ANOVA 2**									Erreur type	p-value***		
	témoin	p-value	inorganique			mixte			organique				source	dose	source* dose
	0	trt	50	75	100	50	75	100	50	75	100				
lutéine	0.020	0.450	0.021	0.016	0.021	0.018	0.020	0.020	0.017	0.018	0.021	0.002	0.984	0.208	0.330
xanthophylle	0.0029	0.540	0.0033	0.0028	0.0034	0.0029	0.0030	0.0031	0.0030	0.0028	0.0029	0.0002	0.381	0.338	0.561
trans-β-carotène	0.027	0.809	0.027	0.022	0.027	0.025	0.025	0.028	0.026	0.025	0.028	0.003	0.878	0.250	0.877
cis-β-carotène	0.0046	0.721	0.0046	0.0041	0.0045	0.0043	0.0045	0.0047	0.0044	0.0043	0.0047	0.0003	0.865	0.247	0.728
caroténoïdes inconnus	0.0073	0.345	0.0073	0.0063	0.0066	0.0067	0.0070	0.0073	0.0066	0.0071	0.0069	0.0003	0.537	0.885	0.134
caroténoïdes totaux	0.062	0.655	0.063	0.051	0.062	0.057	0.060	0.062	0.058	0.057	0.064	0.005	0.975	0.218	0.587
vitamine C	0.146	0.537	0.132	0.141	0.149	0.155	0.135	0.145	0.156	0.144	0.141	0.008	0.474	0.391	0.119
phénols totaux	1.679	0.691	1.782	1.774	1.720	1.863	1.705	1.863	1.814	1.779	1.758	0.106	0.759	0.632	0.751

* L'ANOVA 1 (ANOVA à une voie) a été réalisée en analysant les 10 traitements de l'expérience, incluant le témoin (n = 30).

** L'ANOVA 2 (ANOVA à deux voies) a été réalisée en intégrant les deux facteurs (source et dose) à l'analyse et en excluant le traitement témoin (n = 27).

*** Les moyennes sont issues d'échantillons ayant une taille de n = 9 pour l'effet source, de n = 9 pour l'effet dose et de n = 3 pour l'effet source*dose.

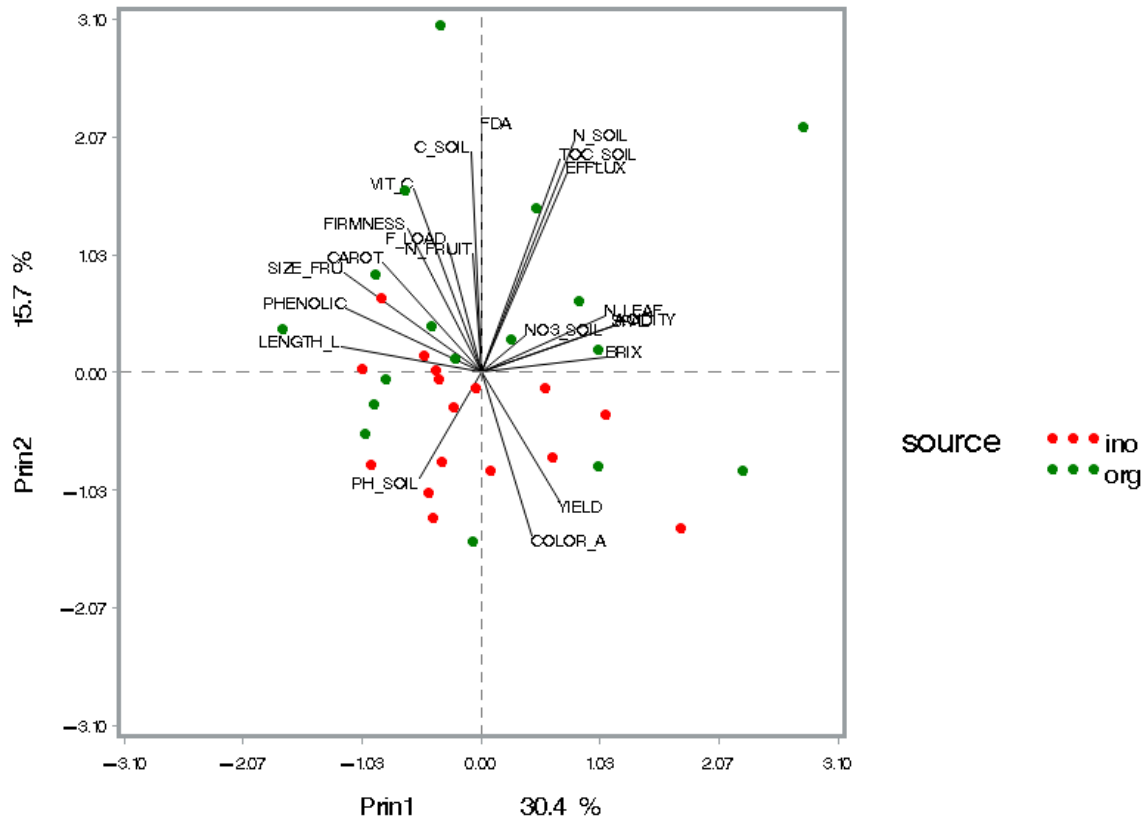


Figure 1. Relationships between growing medium properties, quality and growth variables during the tomato experiment (PCA) (n = 18).

FDA: total enzymatic microbial activity (FDA hydrolysis); N_SOIL: total nitrogen (LECO); TOC_SOIL: growing medium total organic carbon (water-soluble); EFFLUX: growing medium respiration; NO₃_SOIL: growing medium nitrate concentration, N_LEAF: leaf total nitrogen (Kjeldahl); SPAD: chlorophyll content; ACIDITY: fruit titratable acidity; BRIX: fruit total soluble solids; YIELD: fruit salable yield (categories 1 and 2); COLOR_A: a* from CIE L*a*b*; PH_SOIL: growing medium pH; LENGTH_L: length of the 5th leaf; PHENOLIC: total phenolic compounds; SIZE_FRU: fruit size; CAROT: total carotenoids concentration; FIRMNESS: fruit firmness; VITAMIN_C: vitamin c concentration; F_LOAD: fruit load; N_FRUIT: fruit total nitrogen (Kjeldahl); C_SOIL: growing medium total carbon (LECO).

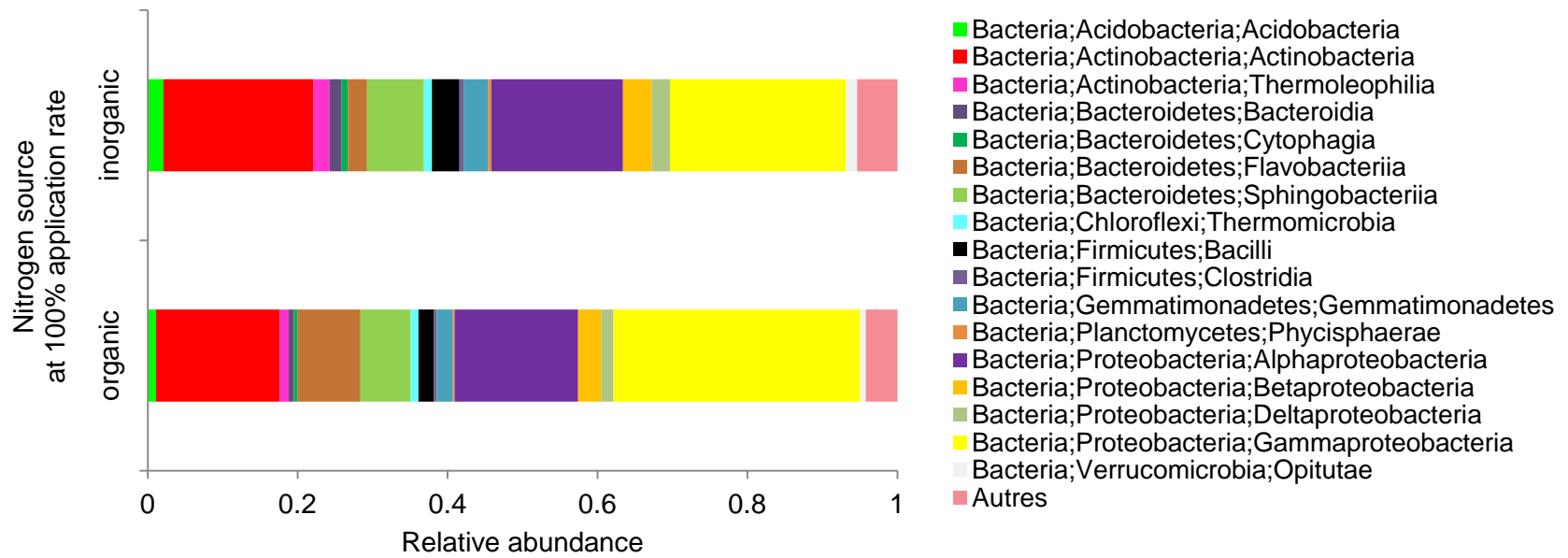


Figure 2. Principal bacteria classes (OTUs) abundance in the growing medium of the tomato greenhouse, 38 days after the transplantation.

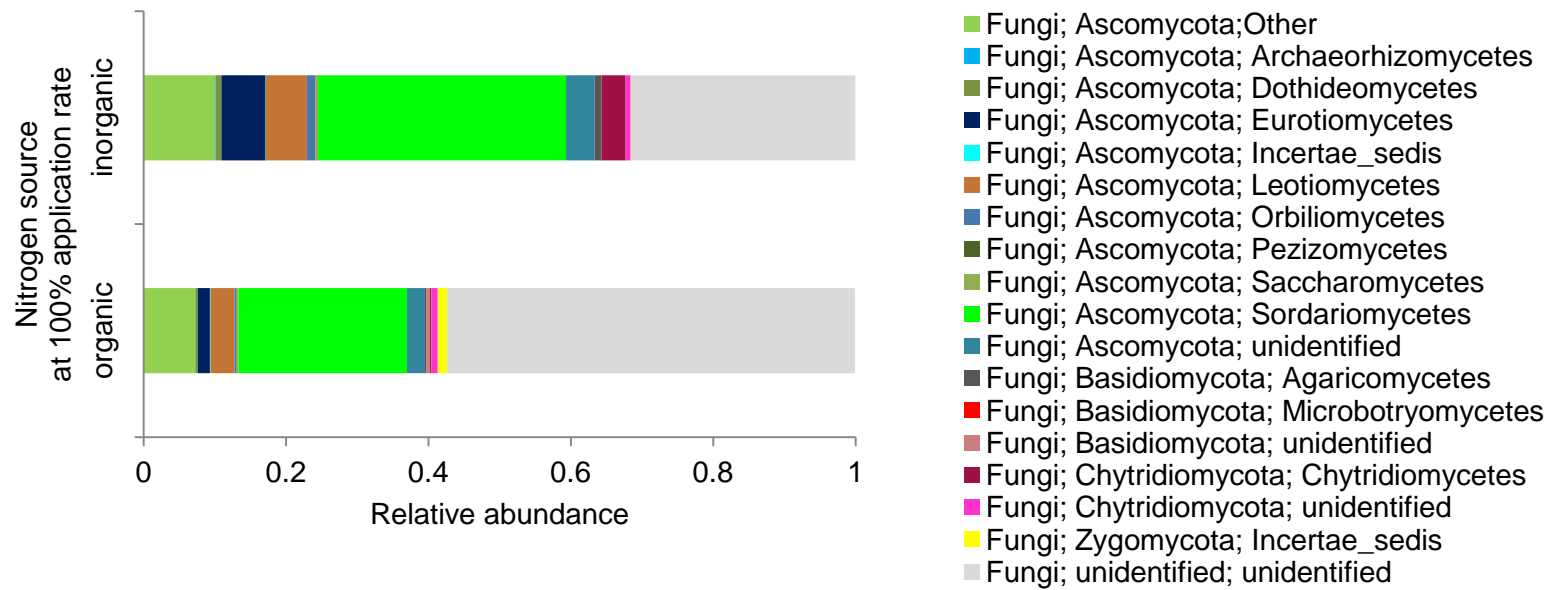


Figure 3. Principal fungi classes abundance (OTUs) in the growing medium of the tomato greenhouse, 38 days after the transplantation.

Tableau 3. Contenu en éléments minéraux des feuilles et des fruits de tomate suite à une analyse de variance (ANOVA).

(mg·kg ⁻¹)		inorganique			organique			Erreur type	source	<i>p-value</i>							
		50	100	150	50	100	150			dose	source*						
Brome	Feuilles	165	a	92	b	73	b	148	a	101	b	77	b	10	0.835	<0.001	0.360
	Fruit	11.9	a	6.8	b	6.2	b	14.3	a	11.9	b	9.0	b	0.1	<0.001	<0.001	0.273
Chlore	Feuilles	1.2	a	0.8	b	0.6	b	1.0	a	0.6	b	0.6	b	0.09	0.071	<0.001	0.726
	Fruit	0.47	a	0.41	b	0.40	ab	0.46	a	0.46	b	0.42	ab	0.02	0.310	0.033	0.390
Magnésium	Feuilles	0.73	a	0.71	a	0.56	b	0.68	a	0.65	a	0.63	b	0.03	0.578	0.005	0.083
Manganèse	Feuilles	135	a	162	b	197	b	130	a	209	b	175	b	19	0.651	0.006	0.148
Phosphore	Feuilles	0.67	a	0.72	b	0.79	b	0.72	a	0.79	b	0.79	b	0.03	0.026	0.001	0.297
Potassium	Fruit	5.18	a	4.96	a	4.99	ab	5.22	a	5.22	a	5.22	a	0.09	0.006	0.252	0.266

Les lettres réparties sur chaque ligne correspondent aux différences de dose observées suite à un test de Tukey ($p < 0.05$).