

Projet 11-INNO1-06

Rapport Final

Effet de l'amendement en biochar des sols biologiques : rétention des nutriments, activité biologique et phytopathogènes



Requérant

**Faculté des sciences de l'agriculture
et de l'alimentation de l'Université
Laval**

Responsable scientifique

Steeve Pepin

Date de fin

15 décembre 2014

**Programme de soutien au développement de l'agriculture biologique
du MAPAQ**

Programme Innovbio

RAPPORT FINAL

Projet #11-INNO1-06

**Effet de l'amendement en biochar des sols biologiques :
rétention des nutriments, activité biologique et
phytopathogènes**

Requérant : Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de
l'Université Laval

Rédigé par :

Steeve Pepin, Martine Dorais, Mireille Thériault et Sara Laurin-Lanctôt

Février 2015

Chercheurs impliqués

Martine Dorais, Ph.D.
Agriculture et Agroalimentaire Canada
Centre de recherche et d'innovation des végétaux
Université Laval, Pavillon de l'Envirotron
2480 boul. Hochelaga, Québec, QC, G1V 0A6
Téléphone: 1-418-656-2131 poste 3939
Télécopieur: 1-418-656-3515
martine.dorais@agr.gc.ca

Philippe Rochette, Ph.D. (émissions de gaz à effet de serre)
Agriculture et Agroalimentaire Canada
Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures
2560, boul. Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3
Téléphone : 418-210-5042
Télécopieur : 418-648-2402
philippe.rochette@agr.gc.ca

Hani Antoun, Ph.D. (microbiologie du sol)
Département des sols et de génie agroalimentaire
Université Laval, Pavillon de l'Envirotron
2480 boul. Hochelaga, Québec, QC, G1V 0A6
Téléphone: 1-418-656-2131 poste 3650
Télécopieur: 1-418-656-3515
hani.antoun@fsaa.ulaval.ca

Anne Weill, Ph.D. (conseillère en innovation)
Chaire de recherche industrielle du CRSNG sur la protection des cultures biologiques
Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité
CÉGEP de Victoriaville, 475 rue Notre-Dame Est Victoriaville, QC, G6P 4B3
Tel: 819-758-6401 poste 2773
Fax : 819-758-8960
anne.weill@cetab.org

Institut québécois du développement de l'horticulture ornementale (IQDHO)
3230, rue Sicotte, E-307, St-Hyacinthe, QC, J2S 2M2
Tél.: 450-778-6514
Fax: 450-778-6537

Responsable de l'institution de recherche requérante

Janice L. Bailey, Ph.D.

Vice-doyenne à la recherche

Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation

Université Laval, Pavillon Paul-Comtois

2425 rue de l'Agriculture, Québec, QC, G1V 0A6

Téléphone: 1-418-656-2131 poste 3354

janice.bailey@fsaa.ulaval.ca

TABLE DES MATIÈRES

1. DESCRIPTION DU PROJET	11
1.1. Objectif général	12
1.2. Objectifs spécifiques	12
2. DÉROULEMENT DES TRAVAUX	12
EXPÉRIENCE 1 – EFFET DU BIOCHAR SUR TROIS CULTURES SUCCESSIVES DE TOMATES DE SERRE	12
2.1. Site et dispositif expérimentaux	12
2.2. Régie de culture	16
2.3. Mesures des paramètres du sol	17
2.3.1. Analyses minérales du sol	17
2.3.2. Analyses minérales des solutions du sol	18
2.3.3. Analyses minérales des lixiviats	18
2.4. Mesures sur les organismes du sol	19
2.4.1. Activité biologique du sol	19
2.4.2. Dénombrement des vers de terre	19
2.4.3. Évaluation de la présence de mycorhizes	20
2.4.4. Respiration du sol	20
2.5. Mesures des gaz à effet de serre	20
2.6. Mesures des paramètres physiologiques	21
2.6.1. Échanges gazeux à l'échelle de la feuille	21
2.6.2. Fluorescence chlorophyllienne (PEA)	21
2.6.3. Croissance des plantes	21
2.6.4. Rendement en fruits	22
2.7. Paramètres mesurés	22
2.8. Analyses statistiques des données	23
EXPÉRIENCE 2 – EFFETS DU BIOCHAR SUR LA COLONISATION DES RACINES PAR <i>PYTHIUM ULTIMUM</i>	24
2.9. Site et dispositif expérimentaux	24
2.10. Régie de culture	25
2.11. Mesures et analyses statistiques	25
EXPÉRIENCE 3 – EFFET DE L'AMENDEMENT EN BIOCHAR SUR LA CROISSANCE ET LE DÉVELOPPEMENT DE PLANTES ORNEMENTALES ET MARAÎCHÈRES CULTIVÉES EN POT	25
2.12. Site et dispositif expérimentaux	25
2.13. Régie de culture	26
2.14. Mesures des paramètres du sol (analyse minérale des solutions de sol et des lixiviats), sur les organismes du sol (respiration du sol, activité biologique du sol, présence de mycorhizes) et des paramètres physiologiques (croissance et biomasse des plantes)	27

3. RÉSULTATS OBTENUS	29
EXPÉRIENCE 1 – EFFET DU BIOCHAR SUR TROIS CULTURES SUCCESSIVES DE TOMATES DE SERRE	29
3.1. Culture 2012	29
3.1.1. Analyses minérales du sol	29
3.1.2. Analyses minérales de la solution du sol	29
3.1.3. Activité biologique du sol	30
3.1.4. Respiration du sol	30
3.1.5. Fluorescence chlorophyllienne	30
3.1.6. Capacité photosynthétique	31
3.1.7. Croissance hebdomadaire des plantes	31
3.1.8. Biomasse destructive	32
3.1.9. Rendement en fruits	32
3.2. Culture 2013	32
3.2.1. Analyses minérales des sols	32
3.2.2. Analyses minérales de la solution du sol	34
3.2.3. Analyses minérales des lixiviats	36
3.2.4. Mesures du carbone organique total dans les lixiviats (TOC)	38
3.2.5. Activité biologique du sol	39
3.2.6. Dénombrement de vers de terre	40
3.2.7. Évaluation de la présence de mycorhizes	40
3.2.8. Respiration du sol	41
3.2.9. Émissions de gaz à effet de serre (CO ₂ et N ₂ O)	42
3.2.10. Croissance des plantes	43
3.2.11. Rendement en fruits	44
3.3. Culture 2014	45
3.3.1. Analyses minérales de la solution du sol	45
3.3.2. Volume des lixiviats	46
3.3.3. Activité biologique du sol	47
3.3.4. Dénombrement de vers de terre	48
3.3.5. Évaluation de la présence de mycorhizes	48
3.3.6. Respiration du sol	48
3.3.7. Croissance des plantes	49
3.3.8. Biomasse destructive	49
3.3.9. Rendement en fruits	50
EXPÉRIENCE 2 – EFFETS DU BIOCHAR SUR LA COLONISATION DES RACINES PAR <i>PYTHIUM ULTIMUM</i>	51
EXPÉRIENCE 3 – EFFETS DE L'AMENDEMENT EN BIOCHAR SUR LA CROISSANCE ET LE DÉVELOPPEMENT DE PLANTES ORNEMENTALES ET MARAÎCHÈRES CULTIVÉES EN POT	54
3.4. Croissance et biomasse	54
3.5. Activité biologique du sol	55
3.6. Flux de CO₂	56
3.7. Extraction à l'eau	56
3.8. Lixiviats	57
3.9. Évaluation de la présence de mycorhizes	59

4. DISCUSSION ET CONCLUSION	60
5. BIENS LIVRÉS	66
6. DIFFUSION DES RÉSULTATS	66
7. DIFFICULTÉS RENCONTRÉES.....	67
ANNEXE 1 – FERTILISATION	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques du biochar utilisé pour le projet.....	14
Tableau 2. Propriétés physico-chimiques ^y des six types de sols utilisés pour le projet.....	15
Tableau 3. Masse volumique apparente (g cm^{-3}) des différents types de sols amendés et non amendés en biochar.....	15
Tableau 4. Calendrier des trois années de cultures expérimentales de tomates.....	16
Tableau 5. Paramètres évalués et fréquence de mesures en fonction de l'année de culture.....	23
Tableau 6. Dates de semis/bouturage, de transplantation et d'évaluations des cultures	26
Tableau 7. Concentrations minérales et CEC du sol à la fin de la culture en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar (Culture 2012; n=3).	29
Tableau 8. Concentrations minérales, pH et CE de la solution du sol en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture (Culture 2012; n=3).	30
Tableau 9. Mesures de la photosynthèse des plantes en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture (Culture 2012; n=3).	31
Tableau 10. Croissance hebdomadaire moyenne des plantes en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture (Culture 2012; n=3).	31
Tableau 11. Biomasse des plantes à la fin de la culture en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar (Culture 2012; n=3).....	32
Tableau 12. Rendement en fruit en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture (Culture 2012; n=3).	32
Tableau 13. Concentrations minérales moyennes des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture ^y (Culture 2013; n=3)	33
Tableau 14. Concentrations minérales moyennes des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois premiers mois de culture ^y (Période 1; Culture 2013; n=3).	33
Tableau 15. Concentrations minérales moyennes des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois derniers mois de culture ^y (Période 2; Culture 2013; n=3).	34
Tableau 16. Concentrations minérales moyennes de la solution des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture ^y (Culture 2013; n=3).	35
Tableau 17. Concentrations minérales moyennes de la solution des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois premiers mois de culture ^y (Période 1; Culture 2013; n=3).	35
Tableau 18. Concentrations minérales moyennes de la solution des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois derniers mois de culture ^y (Période 2; Culture 2013; n=3).	36

Tableau 19. Concentrations minérales moyennes des lixiviats selon le traitement pour toute la durée de la culture ^y (Culture 2013; n=3).	37
Tableau 20. Concentrations minérales moyennes des lixiviats en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois premiers mois de culture ^y (Période 1; Culture 2013; n=3).	37
Tableau 21. Concentrations minérales moyennes des lixiviats en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois derniers mois de culture ^y (Période 2; Culture 2013; n=3).	38
Tableau 22. Quantité de carbone total (mg L^{-1}) dans les lixiviats en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation ^y (Culture 2013; n=3).	38
Tableau 23. Fréquence d'observation (%) des mycorhizes sur les racines selon le type de sol et le traitement à la fin de la culture (Culture 2013; n=3).	41
Tableau 24. Flux de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) émis à la surface du sol en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation ^y (Culture 2013; n=3)	41
Tableau 25. Émissions totales moyennes de CO_2 ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar. Les mesures ont été prises à la fin de chacune des périodes de fertilisation et selon le moment de la fertilisation ^y (Culture 2013; n=3).	43
Tableau 26. Émissions totales moyennes de N_2O ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) selon le traitement à la fin de chaque période de fertilisation selon le moment de la mesure par rapport à la fertilisation ^y (Culture 2013; n=3)	43
Tableau 27. Élongation moyenne hebdomadaire (cm) des plantes en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation ^y (Culture 2013; n=3).	44
Tableau 28. Croissance hebdomadaire de la tige (cm) selon le type de sol et le traitement pour les trois derniers mois de culture ^y (Culture 2013; n=3).	44
Tableau 29. Rendement en fruits cumulatifs (kg m^{-2}) en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation ^y (Culture 2013; n=3).	45
Tableau 30. Concentrations minérales de la solution du sol en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour la période 1 (Fertilisation aux 4 semaines; Culture 2014; n=3).	46
Tableau 31. Concentrations minérales de la solution du sol en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour la période 2 (Fertilisation aux 2 semaines; Culture 2014; n=3).	46
Tableau 32. Volume cumulatif des lixiviats (litres) selon les traitements de biochar, le type de sol et la période de fertilisation (Culture 2014; n=3).	47
Tableau 33. Activité biologique du sol mesurée par l'hydrolyse de la FDA en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).	47

Tableau 34. Dénombrement de vers de terre en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).	48
Tableau 35. Taux de mycorhization (%) des racines en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).	48
Tableau 36. Taux de respiration du sol (flux de CO ₂ en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).	49
Tableau 37. Croissance des plantes en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).	49
Tableau 38. Biomasse destructive des plantes en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).	50
Tableau 39. Rendement en fruit en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).	50
Tableau 40. Effets des traitements de biochar, du type de sol et de l'inoculation des milieux de culture par <i>Pythium ultimum</i> sur la hauteur des plantes et leur biomasse fraîche ou sèche.	51
Tableau 41. Concentrations minérales (mg kg ⁻¹) des substrats après extraction à l'eau (1:2) selon l'espèce et la dose de biochar ajoutée.	58
Tableau 42. Concentrations minérales ($\mu\text{g ml}^{-1}$) des lixiviats selon l'espèce et la dose de biochar ajoutée au substrat.	58
Tableau 43. Fréquence d'observation (%) des mycorhizes sur les racines de poivron, géranium et basilic à la fin de la culture (n=5).	59
Tableau 44. Sommaire des effets de l'amendement en biochar des sols pour les différentes espèces étudiées au cours des trois dernières années. 0 = <i>aucun effet</i> , + = <i>accroissement</i> , - = <i>diminution</i> , nd = <i>non déterminé</i> , na = <i>données à analyser statistiquement</i>	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Vue extérieure du complexe de serres haute performance de l'Université Laval.	13
Figure 2.	Représentation schématique du dispositif expérimental dans la serre de 150 m ²	14
Figure 3.	a) Levée des semences de géranium ; b) Plantule de géranium transplantée ; c) Disposition des pots sur une table avant la répartition aléatoire de ceux-ci.	26
Figure 4.	Assiettes et grilles blanches utilisées pour la récolte de lixiviats et lavage des racines.	27
Figure 5.	Évolution de l'activité microbienne du sol dans le temps pour les deux périodes de fertilisation et selon le type de sol et les traitements de biochar.	39
Figure 6.	Dénombrement des vers de terre contenus dans 1,57 L de sol en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar et la date d'échantillonnage.	40
Figure 7.	Évolution du flux de CO ₂ pour toute la durée de la culture (mai à octobre 2013) selon les types de substrat et le traitement en biochar (n=3).	42
Figure 8.	Effet du pourcentage (0, 10, 15, 20, 30 et 50 %; v/v; B=sable témoin) de l'amendement des sols en biochar sur la hauteur des plantes (n = 36). Les valeurs suivies d'une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de $P \leq 0,05$	51
Figure 9.	Interaction entre les traitements de biochar (0, 10, 30 et 50 %; v/v; B = sable témoin) et les types de sols sur la biomasse sèche des plantes (n = 6).	52
Figure 10.	Interaction entre le type de sol et l'inoculation des plantes par <i>Pythium ultimum</i> sur hauteur des plantes.	53
Figure 11.	Interaction entre le type de sol et l'inoculation des plantes par <i>Pythium ultimum</i> sur la biomasse sèche des plantes.	53
Figure 12.	Effets de différentes doses d'amendements en biochar sur le diamètre de la tige (moyenne \pm erreur type) du basilic, géranium et poivron après 5 et 8 semaines de croissance.	54
Figure 13.	Effets de différentes doses d'amendements en biochar sur la masse sèche des tiges et des feuilles (moyenne \pm erreur type) de plants de basilic, géranium et poivron, évalués après 5 et 8 semaines de croissance.	55
Figure 14.	Effets de différentes doses d'amendements en biochar sur l'activité microbienne du substrat mesurée par hydrolyse de la fluorescéine diacétate (FDA) (moyenne \pm erreur type). L'activité biologique des milieux de culture fut évaluée après 5 et 8 semaines de croissance.	55
Figure 15.	Effets de différentes doses d'amendements en biochar sur la respiration du sol (moyenne \pm erreur type). Les flux de CO ₂ émis à la surface des milieux de culture furent évalués après 5 et 8 semaines de croissance.	56
Figure 16.	Effets de différentes doses d'amendements en biochar sur le volume total de solution nutritive lessivé durant les huit semaines de croissance en serre.	57

Partie 1

1. Description du projet

Afin de répondre à la demande croissante des consommateurs pour des produits biologiques disponibles sur une longue période de l'année, les cultures en serre ou sous abris sont privilégiées. Ces cultures sont toutefois intensives et exigent des amendements importants afin de combler en temps réel la demande en nutriments des plantes. Bien que des apports réguliers soient apportés, la disponibilité aux plantes de certains éléments, dont l'azote, peut limiter la productivité des cultures. D'autre part, l'ajout de compost/amendements biologiques nécessaires aux besoins en azote de la plante peut être modéré par son important contenu en phosphore, souvent présent en très grande quantité dans le sol. Afin de pallier à cette problématique, l'ajout de biochar (biocharbon) au sol pourrait améliorer l'efficacité agronomique et réduire les pertes de nutriments dans l'environnement. En effet, plusieurs études ont démontré que l'ajout de biochar aux sols agricoles augmente la rétention des éléments nutritifs en améliorant la capacité d'échange des cations et des anions (Liang et coll., 2006; Lehmann et Joseph, 2009), stimule l'activité des microorganismes, les symbioses et mycorhizes dans les sols (Warnock et coll., 2007; Steinbeiss et coll., 2009), favorise l'activité enzymatique, la prolifération des microorganismes et biofilms grâce à sa grande surface spécifique et sa densité élevée de pores macroscopiques et microscopiques (Lehmann et coll., 2011). Sa capacité d'adsorber la matière organique soluble, les gaz et les nutriments inorganiques font qu'il constitue un habitat idéal pour les microorganismes, en particulier les bactéries, qui le colonisent pour s'y développer et s'y reproduire (Thies et Rillig, 2009). Outre son effet bénéfique sur la productivité des cultures, il permet également de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) (Gaunt et Cowie, 2009). Toutefois, peu d'études ont été effectuées sur des sols biologiques et son impact sur la prolifération ou suppression des phytopathogènes n'est pas connu.

Pour des cultures hydroponiques en serre, Nichols et Savidov (2009) ont toutefois observé des rendements comparables ou supérieurs lorsque le biochar est utilisé comme milieu de culture. Récemment, nous avons observé que l'amendement en biochar (1:1, v/v) d'un substrat biologique à base de tourbe pour la culture en serre du poivron, de la laitue, du basilic, du géranium et de la coriandre avait des effets variables selon l'espèce, allant de bénéfiques (coriandre), à nuls (poivron et géranium) ou même néfastes (laitue) (Gravel et coll., 2013). Malgré l'absence de maladie, la population de *Pythium ultimum* était cependant plus élevée chez les sols et racines des sols enrichis en biochar.

D'autre part, suite aux normes environnementales concernant les teneurs maximums en phosphore d'un sol, les producteurs biologiques en serre font face à une problématique majeure résultant d'un besoin important en azote pour soutenir ces cultures intensives et à une grande concentration en P de leur sol. Étant donné que le compost est la source principale d'éléments nutritifs (prémisse de l'agriculture biologique) et que ces deux composantes sont souvent indissociables, des moyens alternatifs doivent être proposés afin d'accroître la disponibilité en nutriments et réduire les déséquilibres nutritionnels du sol et par conséquent les risques d'émission d'ions polluants dans l'environnement. À cet effet, certaines études européennes proposent des modèles nutritifs où les apports correspondent aux prélèvements par la plante (Voogt et coll., 2011). La disponibilité des ions en fonction des besoins journaliers de la plante ainsi que l'équilibre entre les ions demeurent toutefois problématique.

1.1. Objectif général

Ce projet avait pour objectif général d'améliorer l'efficacité agronomique des sols biologiques, soit d'augmenter les produits récoltés par unité d'engrais utilisée, et par conséquent réduire l'émission de nutriments dans les nappes phréatiques. Cette étude visait également à développer des façons culturales susceptibles de stimuler l'activité des microorganismes du sol afin d'accroître la minéralisation et, par conséquent, fournir les éléments requis à la plante en temps réel, sans entraîner d'accumulations importantes de phosphore dans les sols biologiques.

1.2. Objectifs spécifiques

- Améliorer la rétention des éléments nutritifs dans les sols biologiques et leur efficacité à être utilisés par les plantes;
- Accroître l'activité microbienne des sols biologiques et leurs taux de minéralisation;
- Réduire les apports d'amendements/fertilisants suite à un meilleur prélèvement par les plantes (apports = besoins);
- Améliorer la microflore des sols et le développement des agents bénéfiques dans les sols;
- Réduire l'incidence des plantes aux maladies racinaires;
- Améliorer la croissance, la productivité et la qualité des produits.

2. Déroulement des travaux

EXPÉRIENCE 1 – Effet du biochar sur trois cultures successives de tomates de serre

2.1. Site et dispositif expérimentaux

Le projet s'est déroulé dans une serre expérimentale de 150 m² du complexe de serres haute performance de l'Université Laval (Québec, QC; Figure 1). Dans cette serre, 36 contenants de culture de 0,62 m³ ont été disposés en trois rangées au centre de la serre. Les rangs de chaque côté ont servi de rangs de garde afin de minimiser les effets de bordure.

A) Deux traitements ont été comparés :

- **Biochar** : Ajout de 10 % biochar (v/v; cultures 2012 et 2013)
Ajout d'un 10 % additionnel de biochar (v/v; total de 20 %; culture 2014)
- **Témoin** : sans biochar.

B) Six types de sols ont été étudiés au cours de ce projet de recherche :

1. sol sableux
2. mélange de sciure, tourbe et compost (6:3:1)
3. mélange de tourbe et compost (9:1)
4. loam
5. loam sablonneux
6. terre noire



Figure 1. Vue extérieure du complexe de serres haute performance de l'Université Laval.

Dans la serre, les 6 types de sol avaient préalablement été introduits dans les 36 bacs ($0,62 \text{ m}^3/\text{bac}$) de culture en 2009 dans le cadre d'une étude portant sur l'irrigation, l'oxygénation et la recirculation des effluents (Gravel et coll. 2011; Pepin et coll., 2011; PSDAB). Les 6 types de sol ont été distribués aléatoirement dans les 6 sections (2 sections par rang, 3 rangs; figure 2). Par la suite, 10 % (v/v) de biochar a été ajouté en 2012, selon le même dispositif que celui utilisé dans l'expérience précédente. En raison de contraintes techniques (tuyauterie), le biochar a été incorporé dans tous les bacs d'une même section ($\frac{1}{2}$ rang) regroupant les 6 types de sol et l'autre demi-section a été laissée sans biochar (témoin; Figure 2). La disposition des traitements s'apparente ainsi à un plan en tiroir (split-plot) avec le biochar en parcelle principale. Cependant, comme chaque bac est indépendant (contenant fermé) et que le biochar a été introduit dans chacun des bacs séparément (et non à une parcelle de sol), l'expérience factorielle (2 traitements et 6 types de sol) a été considérée comme un plan en blocs complets aléatoires où chaque rang représente un bloc contenant 12 bacs de culture, 6 avec biochar (1 bac par type de sol) et 6 sans biochar (témoin). Les 3 rangs représentent ainsi 3 répétitions de 12 traitements pour un total de 36 unités expérimentales (18 u.e./trt biochar et 6 u.e./type de sol). Les plants de garde sont représentés par les bandes grises de chaque côté de la serre sur la figure 2.

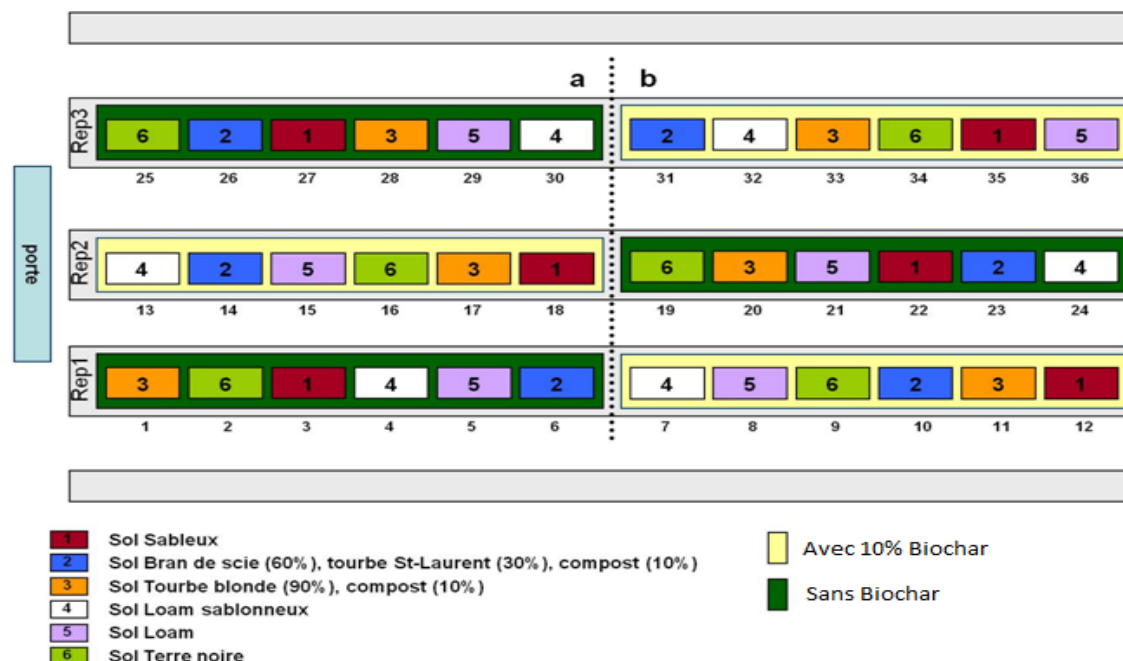


Tableau 1. Propriétés physico-chimiques du biochar utilisé pour le projet.

Paramètres ^z	Valeurs
Cendre (%)	8,4
pH	9,5
CE (mS cm ⁻¹)	1,62
C _{org.} (%)	76
C _{inorg.} (%)	0,45
H/C	0,48
N _{total} (%)	0,45
Masse volumique apparente (g cm ⁻³)	0,08
P _{total} (%)	0,37
K _{total} (%)	20

^z Valeurs pour biochar sec (taux d'humidité: 12,7 %); Source: Soil Control Lab (Watsonville, CA), sauf pour la masse volumique apparente qui a été mesurée en laboratoire.

Avant le début de la culture, une caractérisation des propriétés physico-chimiques des sols a été effectuée (Tableau 2). Les paramètres mesurés incluaient la courbe de désorption des sols (potentiel hydrique versus contenu volumique en eau), la porosité des sols, la masse volumique apparente et un test de granulométrie. De plus, la masse volumique apparente de chacun des types de sols amendés et non amendés en biochar a également été évaluée (Tableau 3).

Tableau 2. Propriétés physico-chimiques^y des six types de sols utilisés pour le projet.

	Types de sols ^z					
	1	2	3	4	5	6
Texture	Sableux	Organique	Organique	Loam	Loam sablonneux	Organique
pH	7,0	6,8	6,8	6,8	7,1	6,8
CE (mS cm ⁻¹)	5,24	3,14	3,67	6,38	4,52	4,72
CEC (cmol kg ⁻¹)	86	97	107	112	94	117
N (mg kg ⁻¹)	599	539	684	979	653	773
P (mg kg ⁻¹)	224	2547	2401	2650	2109	2916
K (mg kg ⁻¹)	1744	2798	2276	2358	1946	2509

^y Analyses de sol effectuées en décembre 2012 dans les bacs témoins sans biochar (avant la plantation en mars 2013);

^z 1) sol sableux; 2) mélange de sciure, tourbe et compost (6:3:1); 3) sol organique (tourbe et compost = 9:1) ayant 40 % de porosité d'air; 4) loam; 5) loam sablonneux; 6) terre noire.

Tableau 3. Masse volumique apparente (g cm⁻³) des différents types de sols amendés et non amendés en biochar.

Type de sol	Traitement	
	Témoin	10 % biochar
1) Sol sableux	0,78	0,54
2) Mélange bran de scie, tourbe et compost	0,26	0,27
3) Mélange tourbe blonde et compost	0,28	0,23
4) Loam	0,76	0,47
5) Loam sablonneux	0,68	0,61
6) Terre noire	0,30	0,27
Moyenne	0,51	0,40

Selon leurs caractéristiques physico-chimiques et les analyses de sol effectuées avant chaque plantation, les sols ont reçu une fertilisation biologique de départ à base d'engrais certifié biologique afin d'équilibrer leurs niveaux nutritifs. Le pH a également été ajusté afin d'éliminer tout biais pouvant être causé par un effet pH. Pour chaque contenant de culture, les éléments nutritifs présents dans les sols ont été comparés à des valeurs de référence pour une culture biologique de tomates sous serre (Dorais

et Schwarz, 2013; Voogt, 1999; Sonneveld et Voogt, 2009; CPVQ, 1990 et Dorais et Dubé, 2011). Cette comparaison a permis de déterminer la quantité d'engrais à ajouter au sol afin d'équilibrer tous les bacs de culture en éléments nutritifs. Ainsi, l'apport d'engrais à apporter au sol a été calculé en fonction du déficit du sol à combler les besoins nutritifs de la culture (réserve du sol – besoins de la plante). Après analyse, tous les éléments nutritifs dans les sols se sont avérés en quantité suffisante à l'exception de l'azote qui présentait des quantités plus faibles pour le NO_3^- et le NH_4^+ que les valeurs de référence souhaitées. Selon les analyses, des quantités déterminées de farine de plumes 13-0-0 (Les engrais naturels McInnes) ont été mélangées à 500 g ou 1 kg de compost Bio-sol Marin 2-1-1 (Fafard Inc.) et appliquées à chacun des bacs de culture afin de combler les besoins en azote. En 2014, la concentration de K a également été ajustée en vue de l'obtention d'un ratio Mg/K de 0,9 mol mol⁻¹ avec un amendement de sulfate de potassium (0-0-50) à 13 % de S.

2.2. Régie de culture

Le déroulement des opérations pour chaque année de culture est résumé au tableau 4.

Tableau 4. Calendrier des trois années de cultures expérimentales de tomates.

	Année de culture		
	2012	2013	2014
Ajout de biochar	10 % v/v	—	Février (+10 % v/v)
Engrais vert	Décembre à janvier	Janvier à mars	Février à avril
Ajustement de la fertilité des bacs	avant plantation	4-11 et 18 avril	23 mai
Début de la culture (transplantation)	26 janvier 10 plantes/bac	13 mars 8 plantes/bac	23 mai 9 plantes/bac
Application de mycorhizes	—	—	12 juin
Fertilisation à chaque semaine	Février à décembre	—	—
Fertilisation aux 4 sem. (période 1)	—	Mai à juillet	Mai à août
Fertilisation aux 2 sem. (période 2)	—	Août à octobre	Août à octobre
Fin de la culture	21 décembre	Novembre	24 octobre

Avant le début de chaque culture, un engrais vert de seigle a été semé pour une période d'environ 6–8 semaines. Les transplants de tomate biologique (*Solanum lycopersicum* cv Trust) ont été plantés aléatoirement à raison de 8 à 10 plantes par bac de culture pour un grand total de 288–360 plantes pour l'ensemble des 36 contenants de culture. Pour une culture de 8 plantes par bac, la densité approximative était de 2,8 plantes m⁻².

Une régie de culture standard a été mise en place pour toute la durée de la saison de croissance. Ainsi, les plants de tomate ont été tuteurés, taillés et effeuillés hebdomadairement. Les grappes ont été taillées à 4 ou 5 fruits et récoltées selon le stade de développement (maturité) des fruits. La pollinisation a été réalisée au moyen de bourdons.

L'irrigation a été effectuée automatiquement grâce à un système contrôlé par tensiomètres, de façon simultanée pour tous les bacs d'un même type de sol (sans égard au traitement). Les seuils de départ ont été de -4,0 kPa pour les sols minéraux (-4,5 kPa en 2014) et de -2,0 kPa pour les sols organiques

(-4,5 kPa en 2014). L'irrigation était faite avec de l'eau de pluie non traitée, entreposée dans des réservoirs ($6,1 < \text{pH} < 6,5$, $n = 2$). La quantité d'eau attribuée par chacune des trois buses par bac du système d'irrigation a été vérifiée et mise à niveau pour être le plus similaire possible entre tous les bacs. En raison d'une fuite dans la tuyauterie, l'irrigation a été effectuée avec l'eau traitée du système d'aqueduc de la Ville de Québec entre le 23 mai et le 3 juillet 2014 ($\text{pH} \sim 7$, $n = 1$). Ensuite, l'eau de pluie a été utilisée. En 2012, les eaux de drainage ont été redistribuées à la culture (système fermé; recirculation des effluents).

Des thermocouples ont été installés dans chacun des bacs afin de faire un suivi continu de la température du sol. La température de la serre a été ajustée en fonction de la vigueur des plantes et le taux d'ensoleillement. Le déficit de pression de vapeur (DPV) était maintenu entre 0,6 et 1,0 kPa.

Suite à la fertilisation biologique effectuée au départ pour équilibrer les différents types de sols, une régie de fertilisation biologique, identique pour toutes les unités expérimentales, a été élaborée afin de répondre aux besoins de la culture. Cette fertilisation était basée sur les études antérieures (PSDAB, Pepin et coll. 2011) et a été adaptée aux besoins de la culture. La fertilisation de chaque culture est détaillée à l'annexe 1. La recette de fertilisation élaborée pour la culture de 2012 (Annexe 1) a été appliquée à la culture de 2013. Les fertilisants organiques utilisés pendant toute l'expérimentation étaient : compost marin (2-1-1; Biosol, Fafard, Saint-Bonaventure QC), farine de plumes (13-0-0; McInnes, Stanstead, QC), algues (1-1-16 ou 0,5-0,2-17; Les Algues Acadiennes, Dartmouth, Nouvelle-Écosse), Gaia Green all purpose (4-4-4; Gaia Green Products Ltd, Grand Forks, Colombie-Britannique) et farine de crevettes (6,5-4,5-0,7; Distrival Canada, Fortierville, QC). Des fertilisants minéraux ont aussi été mélangés à l'eau d'irrigation selon les besoins: sulfate de potassium (0-0-50; Great Salt Lake Minerals Corp., Overland Park, Kansas), sulfate de potassium et de magnésium (0-0-22; 11 % Mg; Agrocentre Lanaudière, St-Thomas-de-Joliette, QC), chlorure de calcium 24 % Ca (Dowflake Xtra, Occidental chemical Corp. Dallas, Texas) et borate de sodium (15 % Bo) [Borax-5 mol, Les produits chimiques CCC, Montréal, QC].

Une fertilisation foliaire d'extraits d'algues marines et de calcium (Oligo-Ca 6%) a été appliquée afin de corriger des carences lors de la culture 2013 et 2014.

2.3. Mesures des paramètres du sol

2.3.1. Analyses minérales du sol

Des échantillons composites de 5–6 carottes de sol ont été prélevés chaque mois dans les 20 premiers centimètres de sol (0–20 cm) pour chacun des contenants de culture (unité expérimentale). Les sols étaient ensuite séchés à l'air ambiant dans des coupelles d'aluminium pendant quelques semaines, puis tamisés à 2 mm et entreposés dans des sacs hermétiques jusqu'à leur analyse minérale. L'extraction des ions pour ces échantillons s'est faite selon la méthode d'extraction Mehlich III, qui extrait les ions aluminium (Al^{3+}), calcium (Ca^{2+}), cuivre (Cu^{2+}), fer (Fe^{2+}), potassium (K^+), magnésium (Mg^{2+}), manganèse (Mn^{2+}), phosphore (P) et zinc (Zn^{2+}), et la méthode d'extraction au chlorure de potassium (KCl) qui permet d'extraire les ions NO_3^- et NH_4^+ . Les deux méthodes consistent à extraire les ions au moyen d'une solution extractive qui se veut un mélange de divers réactifs pour la méthode Mehlich III (Mehlich, 1984) et une solution de chlorure de potassium à 2 M pour la méthode KCl (Maynard et Kalra, 1993). La solution extractive a été ajoutée à une quantité de sols secs (45 mL de solution pour 3 g de sol pour Mehlich III et 50 mL de solution pour 5 g de sol pour KCl) afin d'humidifier le sol et d'en extraire les ions pendant un temps déterminé (5 min pour Mehlich III et 1 h pour KCl) sous agitation à 120 rpm. Ces solutions ont ensuite été filtrées pour n'en garder que le filtrat qui était entreposé à 4°C pour les

échantillons Mehlich III et -20°C pour les échantillons KCl avant leur dosage. Le dosage des ions P , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} et Cu^{2+} s'est fait au moyen d'un spectrophotomètre d'émission à plasma d'argon (ICP-AOE) pour les échantillons Mehlich III. Les deux modèles d'appareils utilisés pour le dosage étaient un Optima 3200DV (PerkinElmer instrument, USA) pour les échantillons analysés avant le mois de novembre 2013 et les échantillons analysés après le mois de novembre 2013 l'ont été avec le modèle ICAP7400 duo (ThermoFisher, USA). Pour la méthode KCl, les ions nitrate et ammonium ont été dosés par colorimétrie automatisée (QuickChem method 12-107-06-2-F, 2003 et QuickChem method 12-107-04-1-B, 2007). Le modèle de l'appareil utilisé pour doser les deux ions (NO_3^- et NH_4^+) était un QuickChem 8500 serie II (Lachat Instruments, Colorado, USA).

2.3.2. Analyses minérales des solutions du sol

Chaque semaine, des échantillons de solution du sol ont été prélevés pour les 36 u.e. au moyen de lysimètres qui étaient enfoncés de façon à ce que la plaque poreuse de l'extrémité inférieure se retrouve à une profondeur de 20 cm dans le sol. Un minimum de 5 mL de solution du sol a été prélevé en avant-midi avant le premier arrosage du matin pour les mesures ultérieures en laboratoire de pH, CE et analyses minérales. Les 36 échantillons ont été conservés à -20°C jusqu'à leurs analyses minérales. Le jour de leur analyse, les échantillons ont été tempérés à température pièce pour un minimum de 30 min. Le pH et la conductivité électrique ont été mesurés au moyen d'un pH-mètre électronique (Fisher Scientific™ Accumet™ XL 500 Benchtop Meter). L'analyse minérale des échantillons a été effectuée à l'aide d'un système de chromatographie ionique ICS-2100 pour les anions et ICS-1100 pour les cations (Dionex Canada Ltd). Les anions mesurés étaient le chlore (Cl^-), les nitrites (NO_2^-), les nitrates (NO_3^-), les phosphates (PO_4^{3-}) et les sulfates (SO_4^{2-}). Les cations mesurés étaient le sodium (Na^+), l'ammonium (NH_4^+), le potassium (K^+), le magnésium (Mg^{2+}) et le calcium (Ca^{2+}). Les ions NO_2^- et NH_4^+ présentaient des concentrations si faibles que l'appareil ne les détectait que rarement. Pour cette raison, ces ions n'ont pas été analysés dans la suite du projet.

2.3.3. Analyses minérales des lixiviats

Les eaux lixiviées des contenants de culture ont été recueillies dans des bassins où le volume total d'eau lixiviée était noté quotidiennement selon le type de sol et le traitement (6 types de sols et 2 traitements donc 12 bassins au total). Une vidange des bassins était effectuée chaque jour afin d'éviter un débordement. Un système de tuyauterie a été conçu afin de recueillir les lixiviats dans ces bassins. Ces tuyaux étaient munis d'un système de valves qui permettait d'échantillonner des lixiviats chaque semaine dans des tubes de 50 mL pour chaque unité expérimentale. Les eaux lixiviées descendaient dans les tuyaux par gravité et la veille de l'échantillonnage, les valves étaient fermées afin d'accumuler un volume de lixiviats dans les tuyaux au lieu qu'ils ne s'écoulent dans les bassins. Un minimum de 15 mL était recueilli afin de mesurer le pH, la conductivité électrique ainsi que d'effectuer l'analyse des ions au moyen d'un chromatographe ionique (Dionex Canada Ltd). Les échantillons ont été congelés à -20 °C jusqu'à leur analyse. Les mêmes étapes d'analyse réalisées par le chromatographe ionique pour les échantillons de solution du sol ont été suivies pour l'analyse des lixiviats et les ions analysés étaient les mêmes.

Par ailleurs, le carbone organique total (TOC), qui se définit comme le carbone lié aux composés organiques, a été mesuré à partir des échantillons de lixiviats (tubes de 50 mL) congelés à -20°C jusqu'au moment de l'analyse. Cette congélation permettait d'arrêter l'activité des microorganismes et ainsi éviter une trop grande dégradation du carbone organique par la microflore du sol (Schumacher, 2002). Cette analyse permettait de connaître la quantité de carbone organique qui était perdue dans les lixiviats du système de culture. Le carbone organique total a été mesuré au moyen d'un analyseur de

carbone organique total (TOC- $V_{\text{CSH/CSN}}$; Shimadzu, Columbia, Maryland, É.-U.). L'appareil mesurait le carbone total (TC) et le carbone inorganique (IC) par une réaction d'oxydation de combustion catalytique.

2.4. Mesures sur les organismes du sol

2.4.1. Activité biologique du sol

Afin de déterminer l'activité biologique du sol basée sur la population microbienne totale, des échantillons composites de sol frais ont été échantillonnés dans les 20 premiers centimètres. Pour éviter de contaminer les échantillons, les outils étaient désinfectés à l'alcool 70 % entre chaque échantillonnage. L'activité biologique était déterminée par l'hydrolyse de la fluorescéine diacétate (FDA) qui mesure une activité enzymatique produite par plusieurs enzymes des microorganismes du sol (Adam et Duncan, 2001). Au moment de l'analyse, 2 g de sol frais était pesé et 15 mL de tampon phosphate de potassium 60 mM a été ajouté au sol. La réaction enzymatique a été amorcée par l'ajout à chaque tube d'échantillon de 200 μL d'une solution de 1000 $\mu\text{L mL}^{-1}$ de fluorescéine diacétate. Les tubes étaient ensuite incubés à 28-30°C pendant 40 min sous agitation, puis la réaction a été arrêtée par l'ajout de 15 mL d'un mélange de chloroforme et méthanol (2:1 v/v). Une centrifugation des tubes à 613 $\times g$ (rotor F14-6x250 FIBERLite) durant 5-8 min pour ces sols biologiques, permettait d'obtenir 10 mL de surnageant exempt d'impuretés. Parallèlement, une courbe étalon (0, 1, 3, 5 et 10 $\mu\text{L mL}^{-1}$) a été préparée en diluant une solution de 20 $\mu\text{g mL}^{-1}$ de fluorescéine dans un tampon phosphate (60 mM de K_2HPO_4). L'hydrolyse de la FDA a été estimée par la mesure de l'absorbance à 490 nm à l'aide d'un spectrophotomètre Hitachi U-1100 uv/vis w/cell. Une couleur jaune plus prononcée indiquait une plus forte activité enzymatique et conséquemment une plus forte activité microbienne de l'échantillon. En 2014, l'étape du chloroforme et méthanol a été abolie; les tubes étaient alors agités seulement pendant 20 min afin de s'assurer que les lectures d'absorbance étaient réalisées dans les 40 min suivant le début de la réaction. La lecture de l'absorbance se faisait dans des microplaques 96 puits, à l'aide d'un lecteur de microplaques (FLUOstar Omega, BGM Labtech GMBH, Ortenberg, Germany).

2.4.2. Dénombrement des vers de terre

Une étude comparative du nombre de vers de terre dans les différents traitements de biochar (10 % biochar versus témoin sans biochar) a été effectuée pour les six types de sols. Au départ, une dizaine de vers de terre (*Lumbricus terrestris*) ont été ajoutés par contenant de culture (36 unités expérimentales) lors de la première culture en 2012. Les vers provenaient de la compagnie « Les appâts Ste-Martine Inc. » à Saint-Michel au Québec. La méthode d'échantillonnage et de dénombrement des vers était basée et inspirée des méthodes du « tri manuel modifié » et du « tri manuel quantitatif à des fins de surveillance » provenant des protocoles nationaux d'échantillonnage (Clapperton, Site Web et Clapperton, 1996). Des échantillons de sol ont été récoltés au moyen d'un cylindre en PVC de 20 cm de hauteur par 10 cm de diamètre (volume de 1571 cm^3 ou 1,57 L). Le cylindre était inséré dans les 20 premiers centimètres de sol et ressorti au moyen d'une truelle. Le sol contenu dans le cylindre était ensuite déposé dans un sac de plastique et entreposé à 4°C pour un maximum de 7 j afin que les vers de terre se vident de leur contenu digestif. L'étape suivante consistait à dénombrer manuellement les vers de terre présents dans le volume de 1,57 L de sol échantillonné. Lors du dénombrement, les vers étaient nettoyés à l'eau tiède et pesés dans des coupelles d'aluminium pour ensuite être séchés pendant 48 h à 70°C afin d'en évaluer la densité (nombre de vers m^{-2}) et la biomasse (g de vers m^{-2}) de vers de terre par unité expérimentale en complément du nombre de vers à l'étude.

2.4.3. Évaluation de la présence de mycorhizes

À la fin de la culture et/ou période de fertilisation, l'évaluation de la présence de mycorhizes a été effectuée. Des racines ont été échantillonnées pour chaque unité expérimentale. Les mottes de racines ont été nettoyées à l'eau puis conservées dans des sacs de plastique et entreposées à 4°C jusqu'à leur coloration et analyse. La procédure de coloration a été adaptée de Phillips et Hayman (1970). Avant la coloration des racines, une sélection des racines les plus fines a été effectuée sur les trois mottes par unité expérimentale. Cette sélection permettait une meilleure pénétration du colorant dans les tissus racinaires. Les racines ont ensuite été déposées dans des tubes coniques de 50 mL perforés afin de permettre aux diverses solutions de nettoyage et de coloration d'atteindre les racines. Les racines ont d'abord été clarifiées dans une solution de KOH 10 % chauffée à l'autoclave à 121°C pendant 45 min. Ensuite, les tubes étaient abondamment rincés à l'eau froide pour ensuite être trempés dans une solution de HCl 1 % pendant 15 min. Puis, les racines ont été rincées rapidement sous l'eau très chaude. Par la suite, les tubes ont été trempés pendant une vingtaine de minutes dans une solution colorante contenant du trypan blue et chauffés à 50°C. Une fois rincées à l'eau froide après la coloration, les racines ont été déposées dans des plats de pétri et recouvertes d'une petite quantité de glycérol 20% pour leur conservation. Les plats de pétri ont été conservés à 4°C à l'obscurité jusqu'à leur analyse. L'évaluation de la colonisation des racines a été adaptée de Gravel et coll. (2009). C'est au moyen d'un binoculaire que la présence de colonisation par les mycorhizes a été effectuée. La Dre Carole Martinez, du Centre de recherche et d'innovation des végétaux (CRIV) de l'Université Laval, a effectué l'analyse visuelle des racines. La coloration bleue d'au moins un mycorhize était requise pour que la présence de colonisation soit notée positive.

2.4.4. Respiration du sol

La respiration du sol a été évaluée à partir des flux de CO₂ émis à la surface du sol. Les mesures de flux ont été prises aux deux semaines à l'aide d'un système portatif de mesure d'échange gazeux, modèle LI-6400 (Li-Cor Biosciences, Lincoln, Nebraska, É.-U.) et d'une chambre pour la respiration du sol, modèle 6400-09. Un à trois jours avant la prise de mesure, des collets en PVC étaient insérés dans le sol afin de laisser 1 cm entre la surface du sol et l'extrémité du collet pour chaque contenant de culture. Ces collets permettent de ne pas perturber la surface du sol lors de la mesure des flux de CO₂. La journée de la prise de mesures, le système d'irrigation était désactivé et les mesures se prenaient autant que possible en matinée avant la première irrigation permettant d'obtenir des flux représentatifs de la respiration du sol. Une fois l'appareil mis en fonction, la chambre était hermétiquement apposée sur le collet. L'appareil mesurait 3 cycles de mesure qui permettaient ensuite de calculer un flux moyen par unité expérimentale.

2.5. Mesures des gaz à effet de serre

Lors de la culture 2013, des mesures d'émissions de gaz à effet de serre (CO₂ et N₂O) ont été prises vers la fin de chaque modification des conditions de culture (période de fertilisation). Des mesures ont été prises avant qu'une fertilisation de base ne soit apportée aux contenants de culture et après leur fertilisation afin de comparer les émissions de gaz à effet de serre. La méthode de mesure se basait sur celle développée par Rochette et Bertrand (2008). Les mêmes collets en PVC utilisés pour la mesure des flux de CO₂ avec le LI-6400 étaient installés dans chaque unité expérimentale 24 h avant l'échantillonnage des gaz. La journée d'échantillonnage des gaz, le système d'irrigation était désactivé. Les chambres à gaz et des poids (briques) étaient installés à proximité de chaque contenant de culture. L'échantillonnage des gaz était effectué pour une série de 6 unités expérimentales à la fois avec 4 temps

de déploiement de 0, 6, 12 et 18 min pour chaque unité expérimentale. La chambre était hermétiquement installée sur le collet au moyen d'un poids (brique) afin d'éviter les fuites et 20 mL de gaz était échantillonné à l'aide d'une seringue insérée dans un septum positionné dans la partie supérieure de la chambre. Le gaz était ensuite injecté dans un flacon dans lequel la présence d'un « dessicant » permettait de préserver un environnement exempt d'humidité. La concentration des gaz (CO_2 et N_2O) a ensuite été évaluée par chromatographie en phase gazeuse (chromatographe modèle 3800 Varian, Walnut Creek, CA, É.-U.) en collaboration avec Philippe Rochette et Normand Bertrand d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Ste-Foy, QC).

2.6. Mesures des paramètres physiologiques

2.6.1. Échanges gazeux à l'échelle de la feuille

Des mesures de photosynthèse (A), transpiration (E), conductance stomatique (g_s) et concentration en CO_2 intercellulaire (C_i) ont été effectuées sur la 5^e feuille d'un plant choisi aléatoirement par unité expérimentale, avec un système portatif de mesure des échanges gazeux (modèle LI-6400, Li-Cor). Les conditions environnementales dans la chambre de mesure de la photosynthèse étaient les suivantes : température de l'air entre 22 et 26°C; humidité de l'air entre 45 et 75 %; $PPFD$ de 1500 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; et concentration de CO_2 dans l'air de 380 ppm. Sous ces conditions, les températures foliaires mesurées furent entre 21°C et 26°C, tandis que le DPV moyen entre la feuille et l'air ambiant était entre ~1,2 et 1,6 kPa. Des courbes de réponse de la photosynthèse à la lumière (A vs. $PPFD$) ont d'abord été effectuées en diminuant progressivement l'intensité lumineuse reçue par la feuille de la saturation vers l'obscurité selon la séquence suivante : 2000, 1500, 1000, 750, 500, 350, 200, 100, 50, 20 et 0 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Puis le $PPFD$ fut ramené à 900 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ afin de permettre à la feuille d'atteindre un taux de photosynthèse stable sous des conditions lumineuses saturantes. Des courbes de réponse de la photosynthèse au CO_2 (A vs. C_i) ont ensuite été effectuées en soumettant la feuille aux concentrations de CO_2 suivantes : 400, 300, 200, 100, 50, 400, 400, 600, 800, 1000, et 1200 ppm de CO_2 . Différents paramètres photosynthétiques ont pu être obtenus à partir de ces mesures en utilisant le modèle d'hyperbole non-rectangulaire de Thornley (1976) pour les courbes A vs. $PPFD$ et l'ajustement de courbe non-linéaire de Sharkey et coll. (2007) pour les courbes A vs. C_i .

2.6.2. Fluorescence chlorophyllienne (PEA)

La mesure de la fluorescence chlorophyllienne a été réalisée sur la 5^e feuille à partir de l'apex en même temps que les mesures de photosynthèse, mais sur des plantes adjacentes à ceux utilisés pour la mesure des échanges gazeux. Le ratio de la fluorescence variable et de la fluorescence maximale (F_v/F_m) a été déterminé grâce à un Plant Efficiency Analyzer (Handy-PEA, Hansatech Instruments, Norfolk, UK). Les feuilles ont d'abord été adaptées à l'obscurité durant une période de 20 min, puis illuminées pendant 1 sec par un flux lumineux de 3000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en 2012 et 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en 2014.

2.6.3. Croissance des plantes

Des mesures de croissance non destructives ont été prises hebdomadairement tout au long de la saison de culture selon la méthode Tom'Pousse (Lambert et coll., 2003). Une plante par unité expérimentale a été choisie selon la représentativité des huit plantes dans le contenant de culture et toutes les mesures étaient prises sur cette plante. Les paramètres mesurés étaient la croissance hebdomadaire de la tige, la longueur d'une feuille mature pleinement étirée, la hauteur de floraison, le nombre de feuilles et le diamètre de la tige. La croissance hebdomadaire de la tige s'obtenait en mesurant la distance entre

l'apex et la marque laissée la semaine précédente correspondant au point de croissance et se prenait au moyen d'un ruban à mesurer. Le diamètre de la tige se prenait au point de croissance de la semaine précédente au moyen d'un vernier et représentait la vigueur du plant. La feuille mature correspondait généralement à la cinquième feuille partant de l'apex ou la feuille se situant immédiatement en dessous de la dernière grappe ayant au moins un fruit noué. Sa longueur était prise à l'aide d'un ruban à mesurer de la pointe de la feuille jusqu'au pétiole. La hauteur de floraison correspondait à la distance mesurée entre la dernière grappe en fleurs et l'apex. Toutes ces mesures ont été utiles afin de suivre la progression des plantes et d'analyser les conditions de la culture.

2.6.4. Rendement en fruits

Le rendement en fruits a été évalué chaque semaine (ou selon le stade de culture) lors de la récolte des fruits. Pendant les mois d'été les plus productifs, deux récoltes par semaine étaient nécessaires. Ainsi, à chaque récolte, un classement des fruits était effectué afin d'évaluer la qualité externe des fruits. Pour chaque classe, le nombre et le poids total des fruits ont été mesurés pour chaque unité expérimentale. Les classes de fruit se présentaient ainsi: fruit en bon état, fruit présentant de la pourriture apicale, fruit avec présence de macrofendillements ou microfendillements, fruit difforme, petit fruit, fruit vert et autre (couleur inégale, taches d'oxalate de calcium, fruit mou ou cicatrice styloïde). Un fruit en bon état était considéré comme un fruit vendable sur le marché contrairement aux fruits présentant des anomalies physiologiques ou des maladies. L'une des principales maladies rencontrées était la pourriture apicale qui survient généralement lors d'une carence en calcium se manifestant sous la forme d'une tache d'abord blanche et pouvant devenir noirâtre à l'extrémité apicale du fruit. Tout comme les mesures de croissance, les informations tirées du rendement sont un bon indice de la santé de la culture.

2.7. Paramètres mesurés

- Caractérisation des propriétés physico-chimiques des sols en début et fin de culture: courbe de désorption (potentiel hydrique vs contenu en eau), porosité des sols, masse volumique apparente, granulométrie;
- Analyses minérales des eaux de lessivage (effluents), de la solution des sols (lysimètres) et des sols (Mehlich III et KCl);
- Activité biologique du sol (FDA);
- Mesures de la respiration du sol (flux de CO₂, LI-6400);
- Mesures des émissions de gaz (flux de CO₂ et N₂O) par chromatographie en phase gazeuse;
- Croissance non destructive (hebdomadaire; Tompousse) et destructive (biomasses fraîches et sèches de la tige, feuilles et fruits; surface foliaire) des plantes;
- Mesures de la fluorescence chlorophyllienne (PEA) et de la capacité photosynthétique (LI-6400);
- Rendement en fruit (poids et classification des fruits).

La fréquence des différents paramètres mesurés est détaillée au tableau 5, selon chaque année de culture.

Tableau 5. Paramètres évalués et fréquence de mesures en fonction de l'année de culture.

	Saison de culture		
	2012	2013	2014
Croissance	Hebdomadaire	Hebdomadaire	Hebdomadaire
Rendement	Hebdomadaire	1 ou 2 fois/semaine	1 ou 2 fois/semaine
Biomasse destructive	Fév., mars, oct. et déc.	Mars, août et nov.	Juil., août et oct.
Fluorescence chlorophyllienne	Aux 2 semaines	—	Essais en pots
Photosynthèse	Sept. et déc.	—	—
Température du sol	—	Quotidien	—
Analyse minérale du sol	Décembre	Mensuel	Mensuel
Analyse de la solution du sol	Aux 1–2 semaines	Hebdomadaire	Hebdomadaire
Volume des lixiviats	—	Quotidien	4 j/sem
Gaz à effet de serre	—	Août et novembre	—
Flux de CO ₂	Aux 2–3 semaines	Aux 2 semaines	Aux 2–3 semaines
FDA	Aux 4 semaines	Aux 2 semaines	Aux 2–3 semaines
Dénombrement de vers de terre	—	Janvier, février, août et novembre	Juin, août et octobre
Mycorhizes	—	Novembre	Août et octobre

2.8. Analyses statistiques des données

Les données recueillies au cours de cette étude ont été analysées à l'aide du logiciel SAS version 9.3 (SAS Institute, 2011). L'évolution des différents paramètres dans le sol dans le temps [flux de CO₂, activité biologique (FDA) et analyse de la solution du sol (lysimètre; pH, CE, contenu minéral)] et la croissance hebdomadaire (élongation, diamètre de la tige et longueur de la feuille mature) ont été étudiées avec la procédure MIXED. Le modèle incluait le traitement (Trt; témoin et biochar), le type de sol (1, 2, 3, 4, 5, et 6; voir la description du dispositif expérimental), le temps (date de prélèvement ou de mesure) et toutes les interactions (sol × trt, temps × trt et temps × sol × trt) comme facteurs fixes ainsi que le bloc et l'interaction bloc × sol × trt comme facteurs aléatoires. Dans cette analyse, le temps a été considéré en mesures répétées et la structure de covariance a été choisie en se basant sur le critère d'Akaike (AIC; le plus petit étant le meilleur). Une analyse globale a d'abord été réalisée puis, dans le cas de la culture 2013 et 2014, les deux périodes de fertilisation (période 1 : fertilisation aux 4 semaines et période 2 : fertilisation aux 2 semaines) ont été analysées séparément.

Pour l'étude de la fluorescence chlorophyllienne, des paramètres photosynthétiques, de la biomasse destructive (masses sèches des feuilles, fruits et tiges), de l'élongation totale du plant et du rendement cumulatif à la fin de chaque période, la procédure MIXED a également été utilisée, avec un modèle incluant le traitement, le sol et l'interaction sol × trt comme facteurs fixes.

Lorsque l'effet sol était significatif ($P \leq 0,05$), les moyennes des 6 types de sol ont été comparées en utilisant le test de comparaisons multiples de Tukey (LSMEANS/PDIFF). Dans le cas d'une interaction significative temps x trt, une analyse détaillée par temps a été effectuée afin de déterminer l'effet du traitement pour chaque modalité du facteur étudié, dans un modèle incluant le traitement, le sol et l'interaction comme facteurs fixes. Dans le cas d'une interaction sol x trt, la même stratégie a été employée et une analyse par type de sol a été effectuée, où le traitement, le temps et l'interaction temps x trt ont été utilisés dans le modèle, avec le temps en mesures répétées.

Les postulats de l'ANOVA (normalité des résidus et homogénéité de la variance) ont été vérifiés par une analyse graphique des résidus et les transformations mathématiques nécessaires ont été appliquées aux données montrant de l'hétéroscédasticité (racine carrée pour l'analyse du nombre de vers de terre).

Enfin, le taux de mycorhization (présence/absence) a été analysé avec la procédure GLIMMIX et traité comme une variable binomiale (0 et 1) en utilisant une fonction de lien logit (link = logit). L'effet du sol sur la présence de mycorhizes a été évalué dans le modèle global, incluant les comptes à la fin des deux périodes de fertilisation, avec le traitement, le sol et l'interaction sol x trt comme facteurs fixes. Pour l'analyse par période de fertilisation, seul l'effet du traitement a pu être testé en raison de la présence de valeurs 0 ou 100 % (variance nulle) lorsque le pourcentage de mycorhization était calculé par combinaison sol x trt par période de fertilisation.

EXPÉRIENCE 2 – Effets du biochar sur la colonisation des racines par *Pythium ultimum*

2.9. Site et dispositif expérimentaux

Deux expériences consécutives se sont déroulées dans une serre expérimentale de 150 m² du complexe de serres haute performance de l'Université Laval (Québec, QC). Lors de la première expérience, des semis de tomate âgés de 3 semaines ont été transplantés dans 6 types de sol (1. sol sableux; 2. mélange de sciure, tourbe et compost, 6:3:1; 3. mélange de tourbe et compost, 9:1; 4. loam; 5. loam sablonneux; 6. terre noire; Tableau 2 et Tableau 3) amendés ou non avec 10% (v/v) de biochar. Le biochar utilisé provenait d'une pyrolyse de copeaux d'épinettes blanches et noires et de sapin baumier effectuée sous un environnement faible en oxygène et à une température se situant entre 700 et 750 °C (Biochar Engineering Inc., Colorado; Tableau 1). Lors de la transplantation, la moitié des plantes a été inoculée avec 15 mL d'une solution de *Pythium ultimum* contenant 10⁷ ufc mL⁻¹ selon la méthode décrite par Gavel et coll. (2009). Une deuxième inoculation a été effectuée après 3 semaines. Un dispositif aléatoire en blocs complets composé de trois répétitions a été utilisé pour un total de 72 unités expérimentales.

Lors de la deuxième expérimentation, quatre traitements de biochar (0, 15, 20, 30 et 50 % v/v) ont été comparés pour 6 types de sol (1. sol sableux; 2. mélange de sciure, tourbe et compost (6:3:1); 3. mélange de tourbe et compost (9:1); 4. Loam; 5. loam sablonneux; 6. terre noire). Un témoin sable sans biochar a également été utilisé. Le biochar utilisé provenait d'une pyrolyse de copeaux d'épinettes blanches et noires et de sapin baumier effectuée sous un environnement faible en oxygène et à une température se situant entre 700 et 750 °C (Biochar Engineering Inc., Colorado; Tableau 1). Lors de la transplantation, la moitié des plantes a été inoculée avec 15 mL d'une solution de *Pythium ultimum* contenant 10⁷ ufc mL⁻¹ selon la méthode décrite par Gavel et coll. (2009). Une deuxième inoculation a été effectuée après 3 semaines. Un dispositif aléatoire en blocs complets composé de trois répétitions a été utilisé pour un total de 186 unités expérimentales.

2.10. Régie de culture

Expériences 1 et 2 – Des semis de tomate (cv Trust) ont été effectués dans des cellules de Jyffi®. Les plantes ont été transplantées dans des pots de 15 cm trois semaines après le semis et déposées sur une table de culture. Un éclairage d'appoint de $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a été apporté durant une photopériode de 16 heures. Les lampes ont été éteintes lorsque le PPFD était supérieur à $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La température jour/nuit a été de $23^{\circ}\text{C}/16^{\circ}\text{C}$ pour une température moyenne 24 h de 19°C . Le déficit de pression de vapeur moyen a été de 7 g m^{-3} . Aucun enrichissement en CO_2 n'a été apporté. Les plantes ont reçu une fertilisation biologique liquide (Converted Organics 2,8-1,5-1,0) correspondant à Gravel et coll. (2013). Ceux-ci ont été irrigués selon les besoins.

2.11. Mesures et analyses statistiques

Les conditions climatiques de la serre (température, DPV, CO_2 , PAR) ont été enregistrées à l'aide du système de contrôle Priva Intégro. La biomasse fraîche et sèche des plantes ainsi que la surface foliaire et la hauteur des plantes ont été mesurées après 8 semaines de croissance. La colonisation des racines par *Pythium ultimum* a été évaluée selon la méthode de Chérif et coll. (1997). Brièvement, 1 g de racines par plante préalablement lavées ont été broyées dans 30 mL d'eau distillée. Des dilutions successives de 1, 1/10, 1/100, 1/1000 et 1/10000 ont été effectuées sur un milieu sélectif (Jeffers and Martin, 1986). Deux répétitions de deux plats de pétri pour chacune des dilutions ont été effectuées. Les colonies de *Pythium ulyimum* ont été comptées après 72 heures d'incubation à 24°C . Les résultats ont été exprimés par nombre de propagules par gramme de racines fraîches. Pour chacun des paramètres étudiés, une analyse de variance (Proc GLM) suivie d'une analyse quadratique a été effectuée à l'aide du logiciel SAS version 9.3 (SAS Institute, 2011) au seuil de $p \leq 0,05$.

EXPÉRIENCE 3 – Effet de l'amendement en biochar sur la croissance et le développement de plantes ornementales et maraîchères cultivées en pot

2.12. Site et dispositif expérimentaux

Le projet s'est déroulé dans l'une des serres expérimentales de 150 m^2 du complexe de serres haute performance de l'Université Laval. Trois espèces ont été utilisées lors de cet essai : le poivron doux (*Capsicum annuum* cv. Early Sunsation X3R), le géranium (*Pelargonium hortorum* cv. Maverick Red) et le basilic (*Ocimum basilicum* cv. Wild Color). Chacune de ces espèces fut cultivée dans un substrat de culture dont la composition (v/v) était la suivante : 60 à 90 % de terreau biologique (Fafard Bio Agro Mix), 10 % de compost et quatre différentes concentrations de biochar, soit 0, 10, 20 et 30 %. Le biochar utilisé fut le même que celui avec lequel les six sols biologiques ont été amendés pour les essais avec les plants de tomate. Le biochar a cependant été tamisé dans ce cas-ci pour obtenir des particules dont le diamètre se situe entre 2 et 4 mm. De plus, il a été « activé » pour minimiser la séquestration des éléments nutritifs par le biochar lors des premières fertirrigations. La quantité de biochar nécessaire pour chacun des traitements fut d'abord mélangée avec 10 % de compost (en fonction des volumes totaux prévus pour chacun des milieux de culture), puis a été fertilisée à quatre reprises durant deux semaines avant de procéder au mélange final avec le terreau biologique. La solution de fertilisation utilisée pour « activer » le biochar était constituée de $12,5 \text{ mL L}^{-1}$ de Convert Organics (2,8-1,5-1,0) et de $2,5 \text{ g L}^{-1}$ de SulpoMag (0-0-20 + 11 % Mg). Un inoculant endomycorhizien a également été ajouté au mélange substrat-compost-biochar.

Les quatre mélanges biologiques (terreau-compost-biochar) ont été utilisés pour remplir des plateaux multicellulaires. De légers creux ont été faits à l'aide d'un doigt afin d'y placer les semences de poivron et de géranium qui ont, par la suite, été recouvertes de vermiculite. Pour le basilic, le bouturage a été fait à partir de boutures de plantes mères. Des sections de tiges les plus vigoureuses ont été sélectionnées puis mises dans des pastilles de tourbe imbibées d'eau et placées sur des plateaux multicellulaires. Les plantules des espèces toutes confondues ont été transplantées le même jour dans des pots de 11,5 cm de diamètre (Tableau 6 et Figure 3). Les valeurs moyennes (\pm écart-type) de pH et de conductivité électrique des quatre milieux de culture étaient $7,01 \pm 0,15$ et $4,29 \pm 0,60 \text{ mS cm}^{-1}$. Les concentrations moyennes en éléments nutritifs (extraits à l'eau 1:2 v/v) du compost, du terreau biologique et des quatre milieux de culture avant empotage sont présentées à l'annexe 1 (Tableau A.3).

Tableau 6. Dates de semis/bouturage, de transplantation et d'évaluations des cultures

Espèce	Semis/ bouturage	Transplantation	Évaluation 1	Évaluation 2
Poivron	03/06/2014	27/06/2014	04/08/2014	25/08/2014
Géranium	30/05/2014	27/06/2014	04/08/2014	25/08/2014
Basilic	12/06/2014	27/06/2014	04/08/2014	25/08/2014

Les quatre traitements étudiés étaient donc : (i) 90 % terreau biologique + 10 % compost + 0 % biochar; (ii) 80 % terreau biologique + 10 % compost + 10 % biochar; (iii) 70 % terreau biologique + 10 % compost + 20 % biochar; et (iv) 60 % terreau biologique + 10 % compost + 30 % biochar. Chacun de ces traitements (i.e. milieux de culture) a été répété cinq fois et chaque unité expérimentale était composée de quatre plantes. Au total, chaque traitement comportait 20 unités expérimentales pour un total de 80 plantes par espèce. Les 240 pots ont été disposés en blocs aléatoires complets sur six tables de $2,2 \text{ m}^2$ chacune. La disposition des pots sur les tables a été faite selon une distribution aléatoire de cinq rangées. Puisqu'il n'y avait pas de plant de garde, le plan aléatoire fut changé toutes les deux semaines afin de minimiser les effets de bordure.

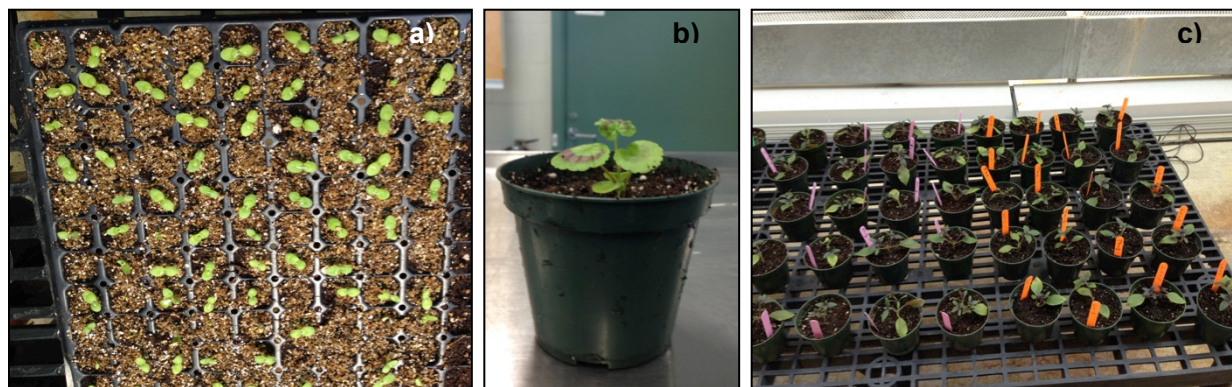


Figure 3. a) Levée des semences de géranium ; b) Plantule de géranium transplantée ; c) Disposition des pots sur une table avant la répartition aléatoire de ceux-ci.

2.13. Régie de culture

La température moyenne durant l'expérience a varié de $16,8^{\circ}\text{C}$ la nuit à $29,1^{\circ}\text{C}$ le jour. L'humidité relative quant à elle a fluctué entre 40 % et 80 %. Lors des journées nuageuses (rayonnement solaire

< 300 W m⁻²), un éclairage artificiel provenant de lampes HPS (*PPFD* ~125 µmol m⁻² s⁻¹ à hauteur de plant) fut utilisé pour combler les besoins en lumière des plantes. Il n'y a pas eu d'enrichissement en CO₂ dans la serre lors de cet essai. Une fertigation fut appliquée à toutes les plantes des trois espèces du lundi au vendredi. La composition de la fertilisation liquide mélangée à l'eau d'irrigation était la suivante : (i) 6,25 ml L⁻¹ de Daniels Organic (3-1-1) ; (ii) 0,35 g L⁻¹ d'algues en poudre soluble Distrival (0,5-0,2-17) ; et (iii) 1,25 g L⁻¹ de SulpoMag (0-0-20 + 11 % Mg). Le Daniels Organic est un fertilisant liquide biologique issu d'extraits de graines oléagineuses (Nature's Source, 2014). Les algues en poudre soluble Distrival sont constituées d'algue marine *Ascophyllum nodosum* (Distrival Canada, 2014). Les volumes d'arrosage variaient de 120 à 260 mL par pot par jour. Les plantes ont reçu une irrigation à l'eau d'environ 100 mL par pot par jour durant les fins de semaine.

2.14. Mesures des paramètres du sol (analyse minérale des solutions de sol et des lixiviats), sur les organismes du sol (respiration du sol, activité biologique du sol, présence de mycorhizes) et des paramètres physiologiques (croissance et biomasse des plantes)

L'évaluation des cultures s'est fait à deux dates différentes (deux plantes par unité expérimentale par date). Un premier échantillonnage a été effectué cinq semaines après la transplantation (4 août 2014) alors que le second a eu lieu huit semaines après la plantation (25 août 2014). Plusieurs paramètres ont été mesurés lors de ces évaluations : (i) le contenu en éléments nutritifs des lixiviats ; (ii) la respiration du sol ; (iii) l'activité biologique du sol ; (iv) la présence de mycorhizes; et (v) la croissance et la biomasse des plants de poivron, de géranium et de basilic. Une récolte des lixiviats a été effectuée après chaque fertigation. À l'aide d'assiettes et des grilles blanches placées sous les pots (Figure 4), le liquide lessivé provenant de 20 unités expérimentales par espèce (i.e. une plante par traitement par répétition par espèce pour un total de 60 échantillons) fut récolté chaque jour dans des bouteilles individuelles, lesquelles furent ensuite mises au réfrigérateur à 4°C. Les échantillons cumulatifs de lixiviat provenant de chaque unité expérimentale furent congelés à -20°C à la fin de chaque semaine durant cet essai, et ce, jusqu'à ce que les analyses minérales soient réalisées.



Figure 4. Assiettes et grilles blanches utilisées pour la récolte de lixiviats et lavage des racines.

Les flux de CO₂ émis par le substrat (i.e. respiration racinaire et microbienne) ont été mesurés pour chacun des traitements à l'aide d'un système portatif de mesures des échanges gazeux et d'une chambre de respiration du sol (LI-6400 et LI-6400-09, Li-Cor BioScience, Lincoln, Nebraska, É.-U.). L'activité microbiologique de chaque substrat a été évaluée par la méthode de la fluorescéine diacétate (FDA) permettant d'évaluer l'activité microbienne globale (Adam et Duncan, 2001). L'évaluation de la présence de mycorhizes a été effectuée à la fin de la culture seulement selon la méthode décrite à la

section 2.5.3. Enfin, la hauteur, la largeur et le diamètre des plantes ainsi que leur surface foliaire totale ont été mesurés lors des deux dates d'échantillonnage. L'évaluation de la biomasse sèche des parties aériennes et souterraines de chaque plante a été effectuée après un séchage à 60°C pendant environ cinq jours.

3. Résultats obtenus

EXPÉRIENCE 1 – Effet du biochar sur trois cultures successives de tomates de serre

3.1. Culture 2012

3.1.1. Analyses minérales du sol

Suite à la première année de culture, l'amendement des 6 types de sols avec 10 % de biochar (v/v) n'a pas affecté le contenu en éléments nutritifs des sols à l'exception du Zn qui a été inférieur de 17 % par rapport aux sols témoins (**Tableau 7**). Puisqu'aucune interaction significative entre les types de sol et le traitement en biochar n'a été observée, le contenu en éléments nutritifs de chacun des six sols n'a pas été présenté.

Tableau 7. Concentrations minérales et CEC du sol à la fin de la culture en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar (Culture 2012; n=3).

	Traitements (Trt)		Valeur de P		
	Témoin	Biochar 10 %	Trt	Sol	Trt×Sol
NO ₃ (mg kg ⁻¹)	556	809	0,1047	0,1199	0,2473
NH ₄ (mg kg ⁻¹)	20	24	0,4596	0,0016	0,5661
P (mg kg ⁻¹)	2458	2491	0,8731	0,1685	0,1722
K (mg kg ⁻¹)	2317	2227	0,5926	<0,0001	0,1762
Ca (mg kg ⁻¹)	16055	15645	0,4912	0,0005	0,8203
Mg (mg kg ⁻¹)	1486	1470	0,8562	0,0041	0,6959
Fe (mg kg ⁻¹)	108	111	0,5960	<0,0001	0,1752
Cu (mg kg ⁻¹)	7	8	0,1229	<0,0001	0,1989
Mn (mg kg ⁻¹)	28	29	0,4650	0,0032	0,2418
Zn (mg kg ⁻¹)	344	285	0,0319	<0,0001	0,4008
CEC (mEq 100 g ⁻¹) ^z	105	100	0,3391	0,0014	0,5282

^z CEC : capacité d'échange cationique

3.1.2. Analyses minérales de la solution du sol

Indépendamment du type de sol, l'amendement des sols en biochar n'a pas influencé la teneur en éléments nutritifs de la solution du sol ni sa CE, alors que le type de sol a influencé la majorité des éléments nutritifs, à l'exception du Ca et Mg (Tableau 8). Aucune interaction significative n'a été observée entre les types de sol et le traitement de biochar pour la CE et la concentration en éléments nutritifs de la solution des sols (Tableau 8). Par contre, une interaction significative a été observée pour le pH. L'effet de l'amendement en biochar sur les différents éléments analysés dans la solution du sol a varié selon la date d'échantillonnage (interaction temps × trt) ainsi que selon la date et le type de sol (temps × trt × sol). Ceci s'explique par les apports réguliers de fertilisants. L'analyse par date

d'échantillonnage n'a cependant détecté aucune différence significative entre les sols amendés ou non de biochar.

Tableau 8. Concentrations minérales, pH et CE de la solution du sol en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture (Culture 2012; n=3).

	Traitements (Trt)		Valeur de P		
	Témoin	Biochar 10 %	Trt	Sol	Trt×Sol
pH	7,0	6,8	0,0492	0,0010	0,0003
CE (mS cm ⁻¹)	3,4	2,8	0,1219	0,0082	0,4827
NO ₃ (µg ml ⁻¹)	839,9	710,2	0,0900	0,0274	0,1718
PO ₄ (µg ml ⁻¹)	63,9	60,0	0,1106	0,0133	0,8700
K (µg ml ⁻¹)	241,9	203,6	0,1712	<0,0001	0,6082
Ca (µg ml ⁻¹)	400,3	323,5	0,1043	0,1625	0,5195
Mg (µg ml ⁻¹)	92,2	81,1	0,3745	0,5606	0,4138
SO ₄ (µg ml ⁻¹)	727,9	557,7	0,2239	0,0081	0,5453
Na (µg ml ⁻¹)	196,9	160,2	0,3464	0,0051	0,5545
Cl (µg ml ⁻¹)	218,0	180,9	0,4225	0,0014	0,6063

3.1.3. Activité biologique du sol

L'effet du biochar sur l'activité biologique des sols mesurée par l'hydrolyse de la FDA a varié selon le type de sol (sol x trt; P = 0,0085). Ainsi, l'amendement en biochar du loam sablonneux a favorisé l'activité biologique du sol en comparaison avec celle des sols témoins (400,1 vs. 328,7 µg h⁻¹ g⁻¹ sol sec). Aucun effet du biochar sur les autres types de sol n'a été observé.

3.1.4. Respiration du sol

Pour la respiration du sol, la différence entre les traitements a varié selon la date de mesure et le type de sol (temps x sol x trt; P = 0,007). L'analyse graphique de l'évolution de ce paramètre a toutefois montré que les deux traitements de biochar (témoin et 10 % v/v) ont eu des valeurs similaires dans la majorité des cas, avec des moyennes de flux de CO₂ de ~40 µmol m⁻² s⁻¹ (données non présentées).

3.1.5. Fluorescence chlorophyllienne

La mesure de la fluorescence chlorophyllienne, telle que le ratio Fv/Fm, nous indique la performance photosynthétique des plantes qui peut être altérée par différents stress abiotiques, notamment la teneur en eau du sol, le contenu en éléments nutritifs et la salinité. Pour la culture 2012, l'amendement des sols en biochar (P = 0,8938) ainsi que le type de sol (P = 0,2237) n'ont eu aucun effet sur la fluorescence chlorophyllienne des feuilles. Aucune interaction significative n'a été observée entre les traitements de biochar et le type de sol (sol x trt ; P = 0,2186).

3.1.6. Capacité photosynthétique

Les taux de photosynthèse (A_{sat}) et de respiration foliaire (R_d) ont été plus élevés en septembre qu'en décembre (31 % et 21 %, respectivement) suite aux conditions lumineuses naturelles, tandis que les rendements quantiques (α) ont été similaires. Toutefois, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements de biochar et les types de sol lors des mesures de photosynthèse (Tableau 9).

Tableau 9. Mesures de la photosynthèse des plantes en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture (Culture 2012; n=3).

	Traitements (Trt)		Valeur de P		
	Témoin	Biochar 10 %	Trt	Sol	Trt×Sol
Septembre					
α^z	0,076	0,080	0,2328	0,6545	0,4811
A_{sat}	25,6	26,4	0,5228	0,2983	0,5241
R_d	2,2	2,1	0,6671	0,6678	0,5475
Décembre					
α	0,077	0,079	0,4800	0,8738	0,8197
A_{sat}	17,0	18,8	0,4608	0,1006	0,4509
R_d	1,8	1,6	0,3918	0,9948	0,9681

^z α : rendement quantique ($\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$ de photons); A_{sat} : taux de photosynthèse nette sous conditions lumineuses saturantes ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$); R_d : taux respiratoire dans l'obscurité ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

3.1.7. Croissance hebdomadaire des plantes

L'amendement des sols en biochar n'a eu aucun effet sur la croissance des plantes exprimée par l'élongation moyenne hebdomadaire des plantes, le diamètre de la tige ainsi que la longueur de la première feuille mature des plantes (Tableau 10). Aucune interaction significative n'a été observée entre les traitements de biochar et les types de sol. D'autre part, le type de sol a affecté significativement les paramètres de croissance des plantes (données non présentées).

Tableau 10. Croissance hebdomadaire moyenne des plantes en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture (Culture 2012; n=3).

	Traitements (Trt)		Valeur de P		
	Témoin	Biochar 10 %	Trt	Sol	Trt×Sol
Élongation moyenne (cm)	17,6	17,3	0,5684	0,0159	0,2745
Diamètre de la tige (mm)	11,4	11,1	0,3202	0,0063	0,7388
Longueur feuille mature (cm)	39,4	39,0	0,5774	0,0014	0,6615

3.1.8. Biomasse destructive

L'amendement des sols en biochar n'a eu aucun effet significatif sur la biomasse sèche des plantes (Tableau 11). Par ailleurs le type de sol a affecté la biomasse sèche des tiges alors qu'une interaction significative a été observée entre les traitements de biochar et les types de sols pour la surface foliaire des plantes.

Tableau 11. Biomasse des plantes à la fin de la culture en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar (Culture 2012; n=3).

	Traitements (Trt)		Valeur de P		
	Témoin	Biochar 10 %	Trt	Sol	Trt×Sol
Surface foliaire (m ²)	15,96	16,08	0,9556	0,1107	0,0175
Masse de feuilles sèches (g)	123,2	120,1	0,9338	0,8199	0,1775
Masse de fruits secs (g)	79,3	69,4	0,2159	0,1400	0,9624
Masse de tiges sèches (g)	198,5	183,3	0,3326	0,0431	0,7515

3.1.9. Rendement en fruits

L'amendement des sols en biochar n'a eu aucun effet significatif sur le nombre et le poids des fruits récoltés (Tableau 12). Par ailleurs, le type de sol a affecté significativement le poids des fruits récoltés. Aucune interaction significative entre les traitements de biochar et les types de sols n'a été observée.

Tableau 12. Rendement en fruit en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture (Culture 2012; n=3).

	Traitements (Trt)		Valeur de P		
	Témoin	Biochar 10 %	Trt	Sol	Trt×Sol
Nombre de fruits (fruit plant ⁻¹)	84,2	78,1	0,5027	0,1781	0,4890
Masse de fruits (kg plant ⁻¹)	15,7	14,5	0,6227	0,0304	0,9296

3.2. Culture 2013

3.2.1. Analyses minérales des sols

Après une deuxième année de culture, une augmentation significative de la concentration minérale des sols a été constatée pour les éléments suivant : NO₃⁻, P, Fe²⁺, Cu²⁺, et Mn²⁺ (Tableau 13). Cette augmentation a été de l'ordre de 19% pour les NO₃⁻, 17% pour le P, 23% pour le Fe²⁺, 62% pour le Cu²⁺ et 35% pour le Mn²⁺. Le Zn²⁺ quant à lui a présenté une réduction significative (P < 0,0001) de l'ordre de 40 % pour les sols amendés en biochar. Au seuil de P < 0,07, les concentrations en K⁺ et Mg²⁺ ont augmenté respectivement de 12% et de 6% alors que la concentration de Ca²⁺ a diminué de 3% pour les sols amendés de biochar. L'ajout de biochar n'a toutefois pas affecté la capacité d'échange cationique (CEC), et ce, pour les deux périodes de fertilisation.

Tableau 13. Concentrations minérales moyennes des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture^y (Culture 2013; n=3)

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	843,4	1007,6	32,8	0,0019
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	63,83	65,3	5,6	0,8565
P (mg kg ⁻¹)	2297,3	2678,0	35,5	<0,0001
K ⁺ (mg kg ⁻¹)	724,2	808,9	29,9	0,0578
Ca ²⁺ (mg kg ⁻¹)	12320	11933	139	0,0616
Mg ²⁺ (mg kg ⁻¹)	1042,4	1101,5	21,9	0,0685
Fe ²⁺ (mg kg ⁻¹)	139,8	172,6	4,0	<0,0001
Cu ²⁺ (mg kg ⁻¹)	8,1	13,1	0,3	<0,0001
Mn ²⁺ (mg kg ⁻¹)	30,9	41,6	0,7	<0,0001
Zn ²⁺ (mg kg ⁻¹)	493,5	297,7	9,9	<0,0001
CEC (cmol kg ⁻¹)	85,0	84,6	0,9	0,7527

^y Huit dates d'échantillonnages entre mai à octobre 2013.

^z Erreur type de la moyenne.

Tableau 14. Concentrations minérales moyennes des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois premiers mois de culture^y (Période 1; Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	707,7	825,1	35,0	0,0269
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	74,7	81,1	10,9	0,6810
P (mg kg ⁻¹)	2119,2	2434,3	44,2	<0,0001
K ⁺ (mg kg ⁻¹)	624,4	666,3	35,4	0,4125
Ca ²⁺ (mg kg ⁻¹)	11991	11862	179	0,6141
Mg ²⁺ (mg kg ⁻¹)	889,9	946,0	31,3	0,2175
Fe ²⁺ (mg kg ⁻¹)	146,3	168,9	4,1	0,0008
Cu ²⁺ (mg kg ⁻¹)	7,9	12,2	0,2	<0,0001
Mn ²⁺ (mg kg ⁻¹)	30,1	37,5	0,9	<0,0001
Zn ²⁺ (mg kg ⁻¹)	463,6	300,2	9,9	<0,0001
CEC (cmol kg ⁻¹)	81,1	81,4	1,0	0,8029

^y Quatre dates d'échantillonnage de mai à juillet 2013 (fertilisation aux 4 semaines).

^z Erreur type de la moyenne.

Lors de la première période de fertilisation (fertilisation aux 4 semaines de mai à juillet 2013), une augmentation significative de la concentration en NO_3^- de 17 %, en P de 15 %, en Fe^{2+} de 15 %, en Cu^{2+} de 54 % et en Mn^{2+} de 25 % et une réduction de 35 % de la concentration en Zn^{2+} ont été observés dans les sols amendés en biochar (Tableau 14).

Durant la seconde période de fertilisation (fertilisation aux 2 semaines du mois d'août à octobre 2013), les sols amendés de 10 % de biochar ont présenté une concentration significativement plus élevée en NO_3^- de 21 %, en P de 18 %, en K^+ de 15 %, en Mg^{2+} de 5 %, en Fe^{2+} de 32 %, en Cu^{2+} de 70 % et en Mn^{2+} de 44 %, par rapport aux sols témoin (Tableau 15). En contrepartie, les concentrations en Ca^{2+} et en Zn^{2+} des sols amendés en biochar ont diminué de 5 % et 44 %, respectivement (Tableau 15).

Tableau 15. Concentrations minérales moyennes des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois derniers mois de culture^y (Période 2; Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
NO_3^- (mg kg ⁻¹)	979,2	1190,2	54,2	0,0116
NH_4^+ (mg kg ⁻¹)	53,0	49,4	4,5	0,5852
P (mg kg ⁻¹)	2475,5	2921,7	51,2	<0,0001
K^+ (mg kg ⁻¹)	824,0	951,5	38,4	0,0284
Ca^{2+} (mg kg ⁻¹)	12650	12004	168	0,0125
Mg^{2+} (mg kg ⁻¹)	1194,9	1257,1	21,1	0,0486
Fe^{2+} (mg kg ⁻¹)	133,3	176,4	4,4	<0,0001
Cu^{2+} (mg kg ⁻¹)	8,2	14,0	0,5	<0,0001
Mn^{2+} (mg kg ⁻¹)	31,8	45,8	0,8	<0,0001
Zn^{2+} (mg kg ⁻¹)	523,3	295,3	12,1	<0,0001
CEC (cmol kg ⁻¹)	88,9	87,8	1,1	0,4540

^y Quatre dates d'échantillonnage (jours juliens 214 à 322); août à octobre 2013 (fertilisation aux 2 semaines).

^z Erreur type de la moyenne.

3.2.2. Analyses minérales de la solution du sol

Pour toute la durée de la 2^e culture (mai à octobre 2013), l'amendement en biochar des sols n'a eu aucun effet significatif sur le contenu minéral de la solution du sol ainsi que sur sa conductivité électrique (CE) et son pH (Tableau 16). Par contre, au seuil de $P < 0,08$, la concentration minérale en Cl^- et Ca^{2+} a diminué de 14 % et 16 %, respectivement alors que K^+ a augmenté de 20 % dans la solution des sols amendés en biochar.

Tableau 16. Concentrations minérales moyennes de la solution des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture^y (Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
NO ₃ ⁻ (µg ml ⁻¹)	420,6	379,0	72,8	0,6413
PO ₄ ³⁻ (µg ml ⁻¹)	56,2	63,4	6,5	0,3021
K ⁺ (µg ml ⁻¹)	73,1	87,5	5,2	0,0592
Ca ²⁺ (µg ml ⁻¹)	278,4	233,8	30,0	0,1370
Mg ²⁺ (µg ml ⁻¹)	40,5	36,9	4,0	0,5377
SO ₄ ²⁻ (µg ml ⁻¹)	225,4	207,8	16,4	0,4554
Na (µg ml ⁻¹)	51,5	43,5	4,8	0,2565
Cl (µg ml ⁻¹)	151,7	131,0	8,0	0,0775
pH	7,3	7,2	0,1	0,3640
CE (mS cm ⁻¹)	1,6	1,5	0,1	0,5817

^y Quinze dates d'échantillonnage de mai à octobre 2013.

^z Erreur type de la moyenne pour les deux traitements en biochar.

Durant la première période de fertilisation (aux 4 semaines de mai à juillet 2013), l'analyse de la solution des sols amendés ou pas avec du biochar a suivi les mêmes tendances que celles obtenues lors de l'analyse globale de toute de culture (Tableau 17). En effet, l'addition de biochar aux sols n'a pas eu d'impact au seuil de $P \leq 0,05$ sur le contenu minéral de la solution du sol.

Tableau 17. Concentrations minérales moyennes de la solution des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois premiers mois de culture^y (Période 1; Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
NO ₃ ⁻ (µg ml ⁻¹)	425,3	361,4	81,0	0,5422
PO ₄ ³⁻ (µg ml ⁻¹)	62,6	62,8	6,8	0,9781
K ⁺ (µg ml ⁻¹)	62,7	74,0	6,7	0,1007
Ca ²⁺ (µg ml ⁻¹)	264,9	216,1	29,6	0,2074
Mg ²⁺ (µg ml ⁻¹)	42,4	34,0	4,7	0,2673
SO ₄ ²⁻ (µg ml ⁻¹)	215,5	191,7	18,0	0,3603
Na (µg ml ⁻¹)	44,0	37,6	5,7	0,4564
Cl (µg ml ⁻¹)	91,8	79,2	6,6	0,1874
pH	7,3	7,3	0,1	0,5917
CE (mS cm ⁻¹)	1,5	1,3	0,1	0,3272

^y Dix dates d'échantillonnage de mai à juillet 2013 (fertilisation aux 4 semaines).

^z Erreur type de la moyenne.

Par ailleurs, lors des derniers mois de culture (fertilisation aux 2 semaines d'août à octobre 2013), l'amendement en biochar des sols a augmenté de 46% la concentration en PO_4^{3-} dans la solution des sols (Tableau 18) : la quantité de PO_4^{3-} dans le traitement amendé en biochar était de $64 \mu\text{g mL}^{-1}$ comparativement à $44 \mu\text{g mL}^{-1}$ pour le traitement témoin ($P = 0,0242$). On a observé une quantité plus importante de Cl^- lors de la seconde période de fertilisation (fertilisation aux 2 semaines). À l'exception du NO_3^- et Mg^{2+} , la concentration des ions dans la solution du sol était généralement supérieure que celle observée lors de la période 1.

Tableau 18. Concentrations minérales moyennes de la solution des sols en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois derniers mois de culture^y (Période 2; Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
NO_3^- ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	423,4	416,6	74,5	0,9248
PO_4^{3-} ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	43,9	64,2	10,4	0,0242
K^+ ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	94,6	115,3	10,4	0,2398
Ca^{2+} ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	308,9	269,3	44,6	0,2244
Mg^{2+} ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	37,0	42,4	6,2	0,5219
SO_4^{2-} ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	250,7	240,8	22,2	0,7523
Na ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	66,9	55,1	7,4	0,2682
Cl ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	277,5	233,9	19,0	0,1161
pH	7,3	7,1	0,2	0,1400
CE (mS cm^{-1})	1,8	2,0	0,2	0,5782

^y Cinq dates d'échantillonnage de août à octobre 2013 (fertilisation aux 4 semaines).

^z Erreur type de la moyenne.

3.2.3. Analyses minérales des lixiviats

Pour toute la durée de la culture 2013, peu de différences ont été observées dans la concentration minérale des lixiviats à l'exception des ions NO_3^- et Ca^{2+} (Tableau 19). Ainsi, l'amendement en biochar des sols a réduit de 30 % la perte de NO_3^- par lixiviation ($P = 0,0216$) et de 20 % la perte de Ca^{2+} ($P = 0,0459$).

L'analyse par période des lixiviats a toutefois montré que cette différence ne s'observait que pour la période 1 (Tableau 20) correspondant à une fréquence de fertilisation de 4 semaines. Durant cette première période, la conductivité électrique (CE) a été de 19 % plus faible dans les lixiviats des sols amendés en biochar ($P = 0,0355$). Globalement, les ions NO_3^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} et Cl^- ont constitué la majorité des pertes d'ions par lixiviation.

Tableau 19. Concentrations minérales moyennes des lixiviats selon le traitement pour toute la durée de la culture^y (Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
NO ₃ ⁻ (µg ml ⁻¹)	359,4	251,7	30,8	0,0216
PO ₄ ³⁻ (µg ml ⁻¹)	26,3	23,5	3,8	0,1855
K ⁺ (µg ml ⁻¹)	43,1	37,2	5,2	0,4223
Ca ²⁺ (µg ml ⁻¹)	252,5	220,9	16,5	0,1885
Mg ²⁺ (µg ml ⁻¹)	50,7	43,9	4,2	0,2534
SO ₄ ²⁻ (µg ml ⁻¹)	212,4	223,3	13,5	0,5695
Na (µg ml ⁻¹)	61,0	58,9	5,2	0,7748
Cl (µg ml ⁻¹)	118,1	126,6	14,1	0,6470
pH	7,4	7,4	0,03	0,2258
CE (mS cm ⁻¹)	1,9	1,7	0,1	0,1509

^y Quatorze dates d'échantillonnage de mai à octobre 2013.

^z Erreur type de la moyenne.

Tableau 20. Concentrations minérales moyennes des lixiviats en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois premiers mois de culture^y (Période 1; Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
NO ₃ ⁻ (µg ml ⁻¹)	388,2	221,7	49,5	0,0202
PO ₄ ³⁻ (µg ml ⁻¹)	29,3	25,4	1,9	0,1513
K ⁺ (µg ml ⁻¹)	46,7	37,4	6,8	0,3237
Ca ²⁺ (µg ml ⁻¹)	223,9	180,2	15,8	0,0459
Mg ²⁺ (µg ml ⁻¹)	46,4	36,7	4,1	0,1430
SO ₄ ²⁻ (µg ml ⁻¹)	183,0	188,2	12,8	0,7835
Na (µg ml ⁻¹)	52,7	49,5	5,1	0,6617
Cl (µg ml ⁻¹)	52,4	60,9	11,3	0,3669
pH	7,4	7,5	0,03	0,1914
CE (mS cm ⁻¹)	1,6	1,3	0,1	0,0355

^y Neuf dates d'échantillonnage de mai à juillet 2013 (fertilisation aux 4 semaines).

^z Erreur type de la moyenne.

Lors de la seconde période de fertilisation (fertilisation aux 2 semaines), l'amendement en biochar n'a pas eu d'impact significatif sur les concentrations minérales des lixiviats (Tableau 21). Les pertes minérales les plus importantes ont été observées encore une fois avec les NO₃⁻, Ca²⁺, SO₄²⁻ et Cl⁻. La concentration des lixiviats en Cl⁻ a été beaucoup plus importante durant la deuxième période de

fertilisation ($57 \mu\text{g mL}^{-1}$ lors de la première période contre $238 \mu\text{g mL}^{-1}$ lors de la seconde période de fertilisation). Les ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} ont également augmenté de façon importante. De plus, on constate une baisse de pH et une hausse de la conductivité électrique lors des derniers mois de culture, en comparaison avec la période 1.

Tableau 21. Concentrations minérales moyennes des lixiviats en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les trois derniers mois de culture^y (Période 2; Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
NO_3^- ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	318,4	303,1	28,3	0,7226
PO_4^{3-} ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	20,9	20,3	1,4	0,7798
K^+ ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	37,1	36,2	4,5	0,8953
Ca^{2+} ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	305,5	290,9	26,3	0,6979
Mg^{2+} ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	59,3	55,8	6,0	0,6871
SO_4^{2-} ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	266,7	285,3	18,5	0,4886
Na ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	76,1	74,1	7,4	0,8509
Cl ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	232,8	243,4	22,7	0,7234
pH	7,3	7,3	0,04	0,9436
CE (mS cm^{-1})	2,5	2,4	0,2	0,6239

^y Cinq dates d'échantillonnage d'août à octobre 2013 (fertilisation aux 2 semaines).

^z Erreur type de la moyenne.

3.2.4. Mesures du carbone organique total dans les lixiviats (TOC)

Au seuil de $P \leq 0,10$, les effluents des sols amendés en biochar ont eu une quantité de carbone total inférieure à celle mesurée pour les traitements témoins (Tableau 22). Autrement dit, moins de carbone a été lixivié dans les sols amendés avec 10 % de biochar.

Tableau 22. Quantité de carbone total (mg L^{-1}) dans les lixiviats en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation^y (Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
Globale	46,5	42,4	1,9	0,0999
Période 1	48,2	44,7	2,1	0,2512
Période 2	43,4	38,8	2,1	0,1391

^y Analyse pour toute la durée de la culture de mai à octobre 2013; Période 1 : fertilisation aux 4 semaines de mai à juillet 2013 et Période 2 : fertilisation aux 2 semaines d'août à octobre 2013.

^z Erreur type de la moyenne.

3.2.5. Activité biologique du sol

L'effet du traitement biochar sur l'activité biologique des sols, mesurée par la FDA, a varié selon la date de mesure et le type de sol ($P = 0,0579$). L'analyse de la première période de fertilisation a également varié selon la date et le type de sol ($\text{sol} \times \text{trt}$; $P = 0,0228$). Ces différences sont illustrées à la Figure 5.

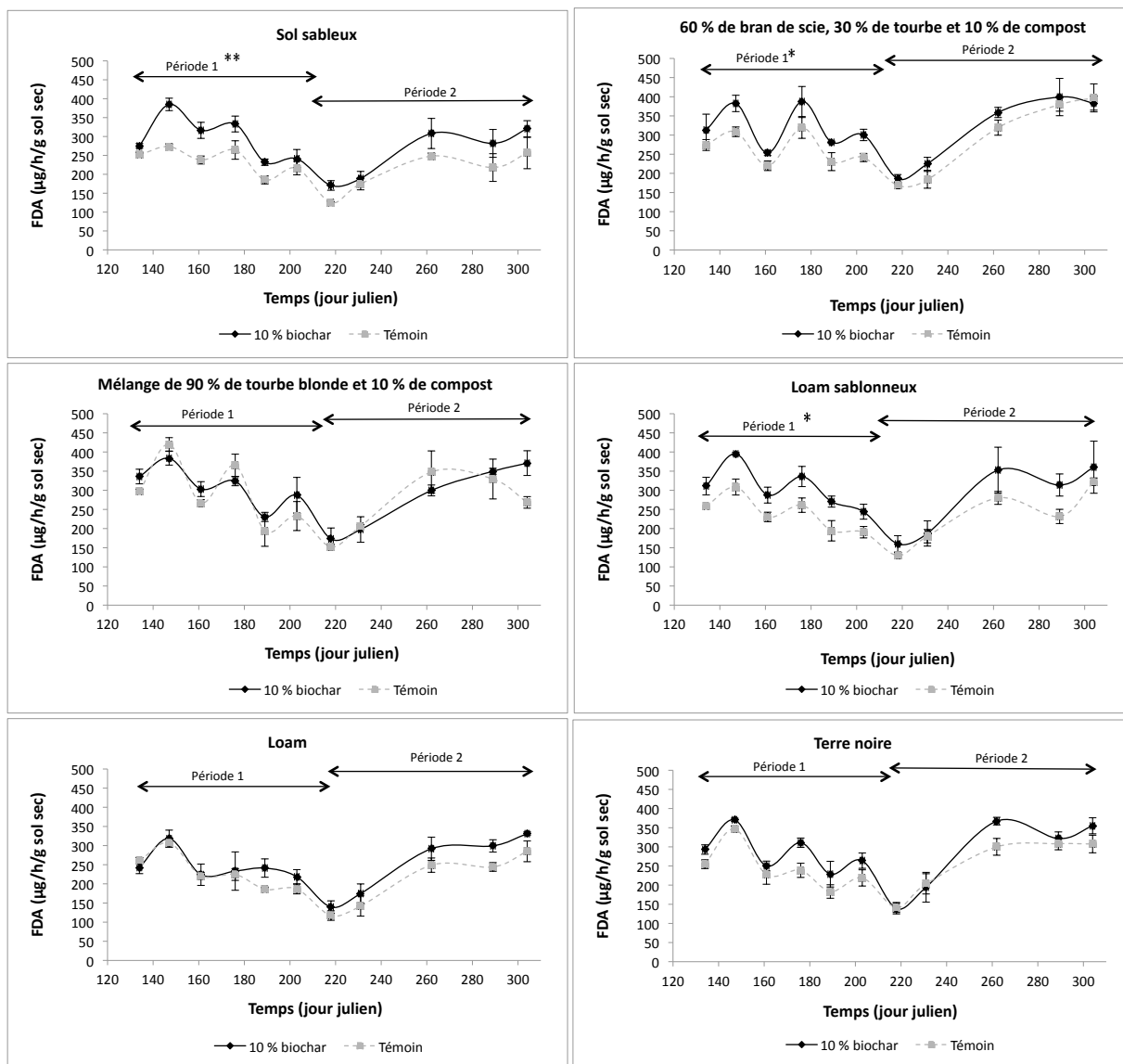


Figure 5. Évolution de l'activité microbienne du sol dans le temps pour les deux périodes de fertilisation et selon le type de sol et les traitements de biochar.

Une augmentation significative de l'activité microbienne du sol amendé en biochar a été constatée pour le sol sableux ($297,1$ vs. $239,0 \mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{sol sec}$ pour le traitement avec biochar vs. témoin; $P = 0,0025$), le mélange de bran de scie, tourbe et compost ($320,4$ vs. $265,6 \mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{sol sec}$ pour biochar vs. témoin; $P = 0,0232$) et le loam sablonneux ($307,1$ vs. $240,7 \mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{sol sec}$, avec vs. sans biochar; $P = 0,0340$). Pour la période 2, la mesure de la FDA a permis de montrer des différences significatives, en faveur des

sols amendés en biochar comparativement aux sols témoin (273,9 vs. 240,7 $\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{sol sec}$; $P = 0,0047$), et ce, pour tous les types de sol.

Les six graphiques de la Figure 5 indiquent une baisse de l'activité biologique autour du jour 220. Cette baisse correspond à une période où la fertilisation des bacs de culture a été faible. À l'inverse, lorsque l'activité microbienne est à la hausse sur les graphiques, cela correspond à une fertilisation plus rapprochée des bacs de culture (Période 2; fertilisation aux 2 semaines).

3.2.6. Dénombrement de vers de terre

Le dénombrement des vers de terre a été effectué à 4 reprises au cours de la culture 2013. L'analyse par date d'échantillonnage a permis de révéler que le nombre moyen de vers de terre observé en février a été plus faible pour les sols amendés en biochar par rapport aux sols témoins ($P = 0,0215$; Figure 6). Malgré un nombre plus faible de vers de terre observé pour les deux autres dates d'échantillonnage, aucune différence significative au seuil de $P \leq 0,05$ n'a été observée.

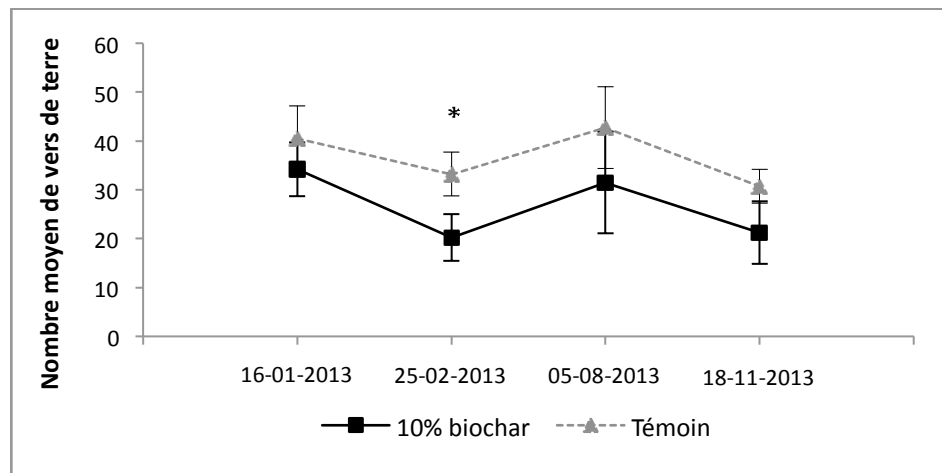


Figure 6. Dénombrement des vers de terre contenus dans 1,57 L de sol en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar et la date d'échantillonnage.

3.2.7. Évaluation de la présence de mycorhizes

L'ajout de 10 % de biochar n'a pas eu d'effet statistiquement significatif sur la colonisation des racines de la tomate par les mycorhizes indigènes, lorsqu'aucun inoculant commercial n'est utilisé (Tableau 23).

Tableau 23. Fréquence d'observation (%) des mycorhizes sur les racines selon le type de sol et le traitement à la fin de la culture (Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)	
	Témoin	10 % biochar
Sol sableux	0	0
Mélange bran de scie, tourbe et compost	33	0
Mélange tourbe et compost	0	33
Loam sablonneux	67	33
Loam	33	33
Terre noire	0	67
Moyenne	22	28

^z Erreur type de la moyenne.

3.2.8. Respiration du sol

Pour l'ensemble de la culture, aucune différence significative n'a été observée pour les flux de CO₂ des sols amendés ou non en biochar (Tableau 24). Toutefois, lors de la première période expérimentale (fertilisation aux 4 semaines), l'amendement en biochar des sols a réduit ($P = 0,0524$) le flux de CO₂, en comparaison aux sols témoins. L'évolution du flux de CO₂ dans le temps a permis de déceler deux hausses distinctes de la respiration du sol le 26 juin 2013 (jour 177) et 18 septembre 2013 (jour 261) (Figure 7). Ces hausses du flux de CO₂ correspondent aux dates de fertilisation des bacs de culture qui ont eu lieu le 20 juin 2013 et le 11 septembre 2013, respectivement.

Tableau 24. Flux de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) émis à la surface du sol en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation^y (Culture 2013; n=3)

	Traitement (Trt)		ETM ^z	Valeur de P
	Témoin	10 % biochar		Trt
Globale	18,5	15,9	1,1	0,1276
Période 1	20,8	17,6	1,1	0,0524
Période 2	14,9	13,3	2,1	0,5994

^y Dix dates de mesures pour toute la durée de la culture de mai à octobre 2013; Période 1 : fertilisation aux 4 semaines, 6 dates de mesure de mai à juillet 2013 et Période 2 : fertilisation aux 2 semaines, 4 dates de mesures d'août à octobre 2013.

^z Erreur type de la moyenne.

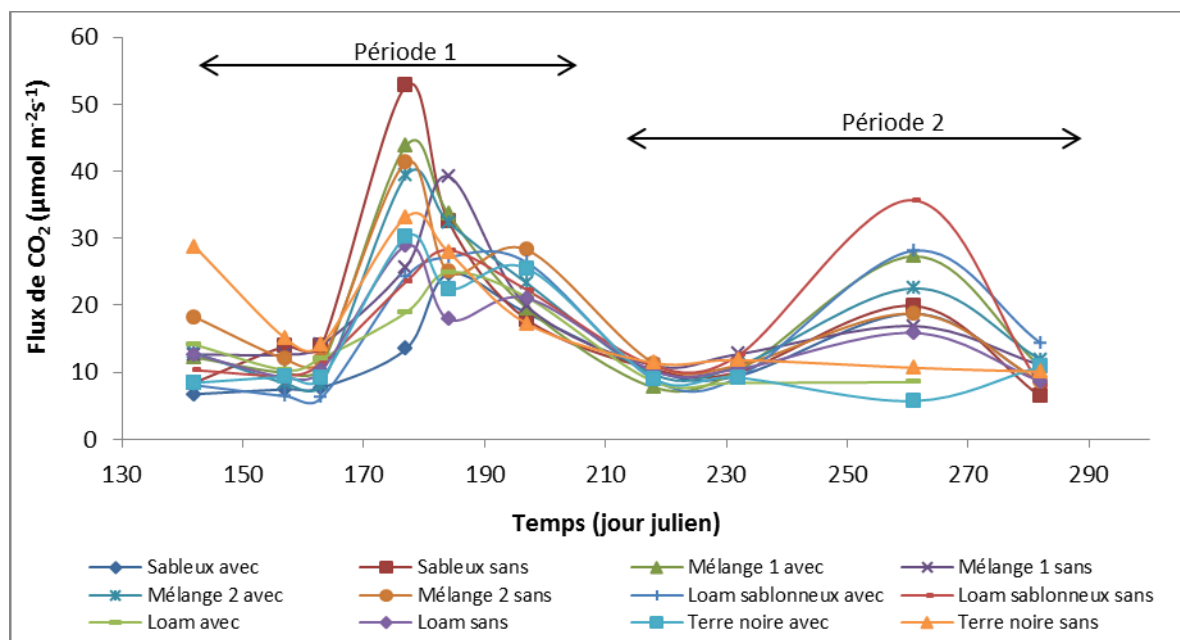


Figure 7. Évolution du flux de CO₂ pour toute la durée de la culture (mai à octobre 2013) selon les types de substrat et le traitement en biochar (n=3).

3.2.9. Émissions de gaz à effet de serre (CO₂ et N₂O)

À la fin de la période 1 (fertilisation aux 4 semaines), les émissions de CO₂ provenant des sols témoins ont été plus élevées que celles des sols amendés avec 10 % de biochar (Tableau 25). Les mêmes résultats furent observés que les mesures soient effectuées avant ($P = 0,0069$) ou après ($P = 0,0720$) l'application des fertilisants. À l'inverse, les émissions de CO₂ observées à la fin de la période 2 (fertilisation aux deux semaines) ont été de 54% plus élevées dans les sols amendés en biochar que les sols témoins ($P = 0,0377$). La différence remarquée entre les traitements a été plus importante après l'application des fertilisants ($P = 0,0113$). Sachant que trois jours séparent les prises de mesure avant et après la fertilisation, la valeur des émissions de CO₂ après la fertilisation des bacs de culture a été plus élevée qu'avant la fertilisation pour les deux dates d'échantillonnage (août et novembre 2013).

La différence entre les traitements de biochar pour les émissions de N₂O n'a pas été significative (Tableau 26). Au seuil de $P \leq 0,10$, les émissions de N₂O en post-fertilisation pour la période 2 ont été supérieures pour les sols amendés en biochar comparativement aux sols témoins ($P = 0,0964$). Indépendamment de la période étudiée, les émissions de N₂O ont été nettement plus élevées après l'application de fertilisants qu'avant son application. Les flux de N₂O ont aussi été plus importants lorsque la fertilisation a été apportée aux deux semaines (période 2) par rapport à des apports aux 4 semaines (période 1).

Tableau 25. Émissions totales moyennes de CO₂ (mg m⁻² s⁻¹) en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar. Les mesures ont été prises à la fin de chacune des périodes de fertilisation et selon le moment de la fertilisation^y (Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)		ETM ^z	Valeur de P
	Témoin	10 % biochar		Trt
Période 1				
Moyenne	0,50	0,37	0,03	0,0233
Avant la fertilisation	0,37	0,28	0,02	0,0069
Après la fertilisation	0,64	0,47	0,07	0,0720
Période 2				
Moyenne	0,44	0,65	0,05	0,0377
Avant la fertilisation	0,25	0,30	0,02	0,0979
Après la fertilisation	0,62	0,99	0,09	0,0113

^y Trois jours séparent la prise de mesure avant et après la fertilisation.

^z Erreur type de la moyenne.

Tableau 26. Émissions totales moyennes de N₂O (mg m⁻² h⁻¹) selon le traitement à la fin de chaque période de fertilisation selon le moment de la mesure par rapport à la fertilisation^y (Culture 2013; n=3)

	Traitement (Trt)		ETM ^z	Valeur de P
	Témoin	10 % biochar		Trt
Période 1				
Moyenne	0,42	0,41	0,10	0,9185
Avant la fertilisation	0,17	0,12	0,04	0,3186
Après la fertilisation	0,67	0,70	0,20	0,9419
Période 2				
Moyenne	2,00	3,41	0,57	0,1356
Avant la fertilisation	0,28	0,52	0,24	0,4045
Après la fertilisation	3,72	6,30	1,05	0,0964

^y Trois jours séparent la prise de mesure avant et après la fertilisation.

^z Erreur type de la moyenne.

3.2.10. Croissance des plantes

L'amendement des sols en biochar n'a pas affecté la croissance hebdomadaire de la tige des plantes, et ce, pour les deux périodes étudiées (tableau 27).

Tableau 27. Élongation moyenne hebdomadaire (cm) des plantes en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation^y (Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
Globale	18,8	18,3	0,5	0,5157
Période 1	17,5	16,5	0,6	0,1611
Période 2	20,6	20,6	0,5	0,9385

^y Analyse globale de mai à octobre 2013; 28 semaines; Période 1 : fertilisation aux 4 semaines de mai à juillet 2013; 16 semaines; Période 2 : fertilisation aux 2 semaines d'août à octobre 2013; 12 semaines.

^z Erreur type de la moyenne.

Pour la seconde période de fertilisation (fertilisation aux 2 semaines), les six types de sols ont toutefois présenté des réponses différentes aux traitements de biochar (Tableau 28). En effet, pour le loam sablonneux et la terre noire, la croissance hebdomadaire de la tige a été de 7 % et 5 %, respectivement, plus élevée lorsque ceux-ci ont été amendés de 10 % biochar alors qu'aucune différence significative n'a été observée pour les autres types de sol.

Tableau 28. Croissance hebdomadaire de la tige (cm) selon le type de sol et le traitement pour les trois derniers mois de culture^y (Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
Sol sableux	19,9	19,9	1,0	1,000
Mélange bran de scie, tourbe et compost	19,3	18,7	0,4	0,4501
Mélange tourbe et compost	18,8	22,0	0,9	0,1186
Loam sablonneux	19,4	20,6	0,1	0,0095
Loam	21,5	20,2	1,2	0,5177
Terre noire	21,8	22,9	0,1	0,0489

^y Douze semaines de août à octobre 2013; fertilisation aux 2 semaines.

^z Erreur type de la moyenne.

D'autre part, pour les autres paramètres de croissance (longueur de la feuille mature, diamètre de la tige, nombre de feuilles, longueur de la grappe en fleurs et hauteur de floraison), aucun effet du biochar n'a été constaté pour toute la durée de la culture ($P \geq 0,4290$; données non présentées).

3.2.11. Rendement en fruits

Le rendement cumulatif total (vendable et non vendable) a été similaire entre les traitements pour les 24 semaines de récolte, soit $\sim 30 \text{ kg m}^{-2}$ (Tableau 29). Aucune différence de rendement cumulatif n'a été observée entre les traitements lors de l'analyse des deux périodes de fertilisation séparément.

Tableau 29. Rendement en fruits cumulatifs (kg m⁻²) en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation^y (Culture 2013; n=3).

	Traitement (Trt)			Valeur de P
	Témoin	10 % biochar	ETM ^z	Trt
Globale	29,5	29,6	0,4	0,8050
Période 1	14,9	14,7	0,3	0,6470
Période 2	14,6	14,9	0,4	0,5431

^y Analyse globale de mai à octobre 2013; 24 semaines de rendement; 2. Période 1 : fertilisation aux 4 semaines de mai à juillet 2013; semaines 1 à 11; Période 2 : fertilisation aux 2 semaines d'août à octobre 2013; semaines 12 à 24.

^z Erreur type de la moyenne.

Pour les derniers mois de la culture (fertilisation aux 2 semaines), l'addition de biochar aux sols a permis de réduire ($P = 0,0127$) de 20 % le nombre de fruits atteints de microfendillement (données non présentées).

3.3. Culture 2014

3.3.1. Analyses minérales de la solution du sol

Puisqu'une interaction significative a été observée entre les traitements de biochar et les périodes étudiées ($P = 0,0003$), les données seront présentées par période. Au cours de la première période de fertilisation (fertilisation aux 4 semaines), l'ajout de 10 % de biochar additionnel aux six types de sols (total de 20 % biochar v/v) a diminué la conductivité électrique dans la solution des sols (1,54 vs. 0,90; $P = 0,0062$; Tableau 30). Les concentrations de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Na^+ et Cl^- dans la solution des sols ont été réduites par 52 %, 55 %, 51 %, 56 %, 40 % et 38 %, respectivement, suite à l'amendement en biochar des sols (Tableau 30). Il est à noter que pour le potassium, l'effet du traitement a varié selon le temps d'échantillonnage, 2 des 3 analyses donnant des concentrations inférieures dans tous les sols avec biochar, comparativement aux témoins. Par ailleurs, les taux de nitrates ont été affectés significativement par l'ajout de biochar, mais seulement dans le sol sableux (112 vs. 476 $\mu g\ ml^{-1}$; $P < 0,0001$) et le loam (150 vs. 467 $\mu g\ ml^{-1}$; $P 0,0001$). Une tendance du même ordre a été observée dans les bacs contenant le loam sablonneux (53 vs. 169 $\mu g\ ml^{-1}$; $P = 0,0978$). Le loam amendé de biochar avait plus de PO_4 que le loam témoin (70 vs. 40 $\mu g\ ml^{-1}$; $P = 0,0298$).

Lors de la deuxième période d'expérimentation (fertilisation aux 4 semaines), l'ajout de 20 % biochar dans les bacs a entraîné une diminution de la CE de la solution du sol à 3 des 4 temps d'échantillonnage (mesures 1, 3 et 4), seule la CE du 3 septembre 2014 (mesure 2) était similaire entre les traitements. La concentration en Na de la solution du sol a été de 48 % plus faible dans les traitements avec biochar, en comparaison avec la solution du sol des sols témoins (Tableau 31). Le NO_3 de la solution des sols a été réduit en moyenne de 38 % suite à l'amendement en biochar des sols. Cette réduction a cependant été significative que pour les deux premiers échantillonnages, le troisième échantillonnage n'étant pas significatif au seuil de $P \leq 0,05$. La concentration en Ca a été réduite de 49 % dans la solution du sol des bacs amendés en biochar. La concentration en Mg, SO_4 et Cl dans la solution des sols amendés en biochar a été inférieure de 18 %, 30 % et 30 %, respectivement, par rapport à la solution des sols témoins. Cependant, seules les analyses de la fin septembre et octobre ont été significativement inférieures. La teneur de la solution des sols en K et le PO_4 n'a pas été affectée par les traitements de biochar.

Tableau 30. Concentrations minérales de la solution du sol en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour la période 1 (Fertilisation aux 4 semaines; Culture 2014; n=3).

	Traitements (Trt)			Valeur de P		
	Témoin	Biochar 20 %	ETM ²	Trt	Sol	Trt×Sol
pH	7,51	7,52	0,07	0,9589	0,5246	0,2413
CE (mS cm ⁻¹)	1,54	0,90	0,15	0,0062	0,0205	0,7415
NO ₃ (µg ml ⁻¹)	232,8	72,5	20,0	<0,0001	<0,0001	0,0050
PO ₄ (µg ml ⁻¹)	42,9	39,3	3,9	0,5076	0,1361	0,0473
K (µg ml ⁻¹)	216,6	104,5	35,1	0,0299	0,1830	0,6170
Ca (µg ml ⁻¹)	140,5	63,4	14,9	0,0013	0,0596	0,4692
Mg (µg ml ⁻¹)	30,5	15,0	4,4	0,0185	0,5019	0,7833
SO ₄ (µg ml ⁻¹)	374,0	165,0	70,5	0,0445	0,4406	0,6807
Na (µg ml ⁻¹)	34,3	20,6	3,1	0,0040	0,6175	0,8887
Cl (µg ml ⁻¹)	22,0	13,6	2,9	0,0393	0,4183	0,9129

²ETM : Erreur type de la moyenne.

Tableau 31. Concentrations minérales de la solution du sol en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour la période 2 (Fertilisation aux 2 semaines; Culture 2014; n=3).

	Traitements (Trt)			Valeur de P		
	Témoin	Biochar 20 %	ETM ²	Trt	Sol	Trt×Sol
pH	7,42	7,38	0,07	0,6965	0,6451	0,5919
CE (mS cm ⁻¹)	4,2	3,6	0,2	0,0375	0,0551	0,5000
NO ₃ (µg ml ⁻¹)	275,2	171,1	34,5	0,0408	0,5054	0,4319
PO ₄ (µg ml ⁻¹)	25,6	26,2	3,4	0,9008	0,8480	0,6987
K (µg ml ⁻¹)	756,0	730,7	42,1	0,6687	0,0032	0,3002
Ca (µg ml ⁻¹)	541,8	275,3	26,5	<0,0001	0,0175	0,0972
Mg (µg ml ⁻¹)	88,7	72,4	7,0	0,0526	0,0073	0,6719
SO ₄ (µg ml ⁻¹)	2049,0	1443,9	124,7	0,0021	<0,0001	0,2470
Na (µg ml ⁻¹)	105,0	54,8	9,1	0,0007	0,2126	0,1141
Cl (µg ml ⁻¹)	226,7	157,9	14,0	0,0019	0,0134	0,1669

²ETM : Erreur type de la moyenne.

3.3.2. Volume des lixiviats

Le volume des lixiviats, cumulé par période de fertilisation, est présenté au Tableau 32. De façon générale, l'amendement des sols avec 20% de biochar n'a pas permis de réduire la quantité de lixiviats.

Tableau 32. Volume cumulé des lixiviats (litres) selon les traitements de biochar, le type de sol et la période de fertilisation (Culture 2014; n=3).

Type de sol	Traitements (Trt)	
	Témoin	Biochar 20 %
Période 1		
Sol sableux	91,6	229,4
Mélange bran de scie, tourbe et compost	311,2	165,9
Mélange tourbe et compost	300,8	340,9
Loam sablonneux	241,4	253,7
Loam	206,3	341,3
Terre noire	341,8	300,6
Période 2		
Sol sableux	17,8	90,3
Mélange bran de scie, tourbe et compost	54,8	88,4
Mélange tourbe et compost	166,7	233,2
Loam sablonneux	66,1	172,1
Loam	207,5	160,0
Terre noire	185,5	200,5

3.3.3. Activité biologique du sol

L'amendement des sols avec 20 % de biochar a augmenté de 30 % l'activité biologique des sols exprimée par le dosage de la FDA (31 % lors de la période 1; 27 % lors de la période 2; Tableau 33). Seul le dernier échantillonnage de la période 2 n'a pas été significativement différent du témoin (données non présentées).

Tableau 33. Activité biologique du sol mesurée par l'hydrolyse de la FDA ($\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{sol sec}$) en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).

FDA ($\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1} \text{sol sec}$)	Traitements (Trt)			Valeur de P		
	Témoin	Biochar 20 %	ETM ²	Trt	Sol	Trt×Sol
Globale	92,3	120,7	3,5	<0,0001	<0,0001	0,1957
Période 1	115,0	153,2	7,1	0,0009	0,0052	0,3245
Période 2	77,2	99,4	3,9	0,0004	0,0007	0,7859

²ETM : Erreur type de la moyenne.

3.3.4. Dénombrement de vers de terre

L'amendement des sols avec 20% de biochar a réduit de 49% le nombre de vers de terre par rapport aux sols témoins (Tableau 34; $P = 0,0016$). Le type de sol a également influencé la population de vers de terre. Aucune interaction significative n'a été observée.

Tableau 34. Dénombrement de vers de terre en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).

	Traitements (Trt)		Valeur de P		
	Témoin	Biochar 20 %	Trt	Sol	Trt×Sol
Globale	14,6	7,5	0,0016	0,0348	0,5399
Période 1	11,6	6,4	0,1286	0,0599	0,6336
Période 2	18,0	8,6	<0,0001	0,0394	0,7135

3.3.5. Évaluation de la présence de mycorhizes

L'amendement des sols avec 20 % de biochar et le type de sol n'ont pas affecté significativement la mycorhization des racines (Tableau 35).

Tableau 35. Taux de mycorhization (%) des racines en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).

	Traitements (Trt)		Valeur de P		
	Témoin	Biochar 20 %	Trt	Sol	Trt×Sol
Globale	58,3	61,1	0,8834	0,9815	0,2014
Période 1	83,3	66,7	0,2637	.	.
Période 2	55,6	33,3	0,1925	.	.

3.3.6. Respiration du sol

En général, l'amendement des sols avec 20 % de biochar a augmenté le flux de CO_2 de 17 % par rapport aux sols témoins. L'analyse de la période 1 a permis de démontrer que le flux de CO_2 a été supérieur de 12 % dans les bacs contenant du biochar, et ce, pour tous les types de sol (Tableau 36) et tous les temps d'échantillonnage. Pour la période 2, cette augmentation a été de 23 %, bien que l'effet tende à s'estomper en fin de la période (temps x trt $P = 0,1259$).

Tableau 36. Taux de respiration du sol (flux de CO₂ en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour toute la durée de la culture et pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).

	Traitements (Trt)		ETM ²	Valeur de P		
	Témoin	Biochar 20 %		Trt	Sol	Trt×Sol
Globale	8,3	9,7	0,2	0,0003	0,5102	0,1786
Période 1	8,9	10,0	0,3	0,0142	0,8357	0,3581
Période 2	7,7	9,5	0,3	0,0002	0,4297	0,5231

² ETM : Erreur type de la moyenne.

3.3.7. Croissance des plantes

L'amendement en biochar des sols n'a eu aucun effet significatif sur les paramètres de croissance hebdomadaire des plantes notamment l'élongation de l'apex, le diamètre de la tige et la longueur de la première feuille mature (Tableau 37). Seul le type de sol a pu influencer certains paramètres de croissance (données non présentées).

Tableau 37. Croissance des plantes en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).

	Traitements (Trt)		ETM ²	Valeur de P		
	Témoin	Biochar 20 %		Trt	Sol	Trt×Sol
Période 1						
Élongation totale (cm)	268,8	265,2	6,8	0,6450	0,3948	0,3000
Diamètre de la tige (mm)	10,4	10,5	0,1	0,5965	0,0009	0,0736
Longueur feuille mature (cm)	43,2	42,8	0,6	0,5691	0,2615	0,9261
Période 2						
Élongation totale (cm)	204,6	207,1	3,9	0,6078	0,0541	0,6355
Diamètre de la tige (mm)	9,5	9,2	0,2	0,2133	0,4852	0,8352
Longueur feuille mature (cm)	42,4	41,9	0,6	0,5205	0,1566	0,7342

² ETM : Erreur type de la moyenne.

3.3.8. Biomasse destructive

Similairement à la croissance hebdomadaire, l'amendement en biochar des sols n'a eu aucun impact significatif sur la biomasse des plantes, et ce pour les deux périodes étudiées (Tableau 38). Au seuil de $P \leq 0,10$, seule la masse sèche des feuilles des plantes récoltées après la période 2 (fertilisation aux deux semaines) et cultivées dans des sols amendés de biochar a été de 5 % inférieure aux feuilles des plantes témoins.

Tableau 38. Biomasse destructive des plantes en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).

	Traitements (Trt)			Valeur de P		
	Témoin	Biochar 20 %	ETM ^z	Trt	Sol	Trt×Sol
Période 1						
Surface foliaire (m²)	8,09	8,63	0,53	0,3858	0,0157	0,1255
Masse de feuilles sèches (g)	33,2	33,6	1,7	0,8648	0,0017	0,1756
Masse de fruits secs (g)	83,2	81,5	9,6	0,8991	0,0227	0,4699
Masse de tiges sèches (g)	40,8	42,1	2,2	0,6886	0,0566	0,4129
Période 2						
Surface foliaire (m²)
Masse de feuilles sèches (g)	54,9	51,9	1,3	0,0955	0,6947	0,4044
Masse de fruits secs (g)	97,7	98,1	3,9	0,9151	0,9869	0,6914
Masse de tiges sèches (g)	75,4	71,4	2,0	0,1590	0,3786	0,8811

^z ETM : Erreur type de la moyenne.

3.3.9. Rendement en fruits

L'amendement en biochar des sols n'a pas affecté le nombre de fruits ni la masse des fruits récoltés par m² au cours des deux périodes étudiées (Tableau 39). Par ailleurs, le type de sol a influencé le rendement en fruits lors de la période 2 (fertilisation aux deux semaines).

Tableau 39. Rendement en fruit en fonction de l'amendement ou non des sols en biochar pour les deux périodes de fertilisation (Culture 2014; n=3).

	Traitements (Trt)			Valeur de P		
	Témoin	Biochar 20 %	ETM ^z	Trt	Sol	Trt×Sol
Période 1						
Nombre de fruits (fruit m ⁻²)	35,9	36,9	0,8	0,3890	0,2022	0,3876
Masse de fruits (kg plant ⁻¹)	2,2	2,2	0,1	0,7546	0,1296	0,1278
(kg m ⁻²)	6,1	6,1	0,2	0,7546	0,1296	0,1278
Période 2						
Nombre de fruits (fruit m ⁻²)	64,2	59,5	2,0	0,1119	0,0732	0,8790
Masse de fruits (kg plant ⁻¹)	3,9	3,7	0,1	0,1885	0,0095	0,7047
(kg m ⁻²)	9,8	9,2	0,3	0,1885	0,0095	0,7047

^z ETM : Erreur type de la moyenne.

EXPÉRIENCE 2 – Effets du biochar sur la colonisation des racines par *Pythium ultimum*

Le Tableau 40 présente l'effet des traitements de biochar, du type de sol et de l'inoculation du sol avec *Pythium ultimum* sur la hauteur des plantes et leur biomasse fraîche et sèche. Un effet négatif ($p < 0,05$) du biochar sur la hauteur des plantes a été observé, et ce, peu importe le type de sol ou l'inoculation ou non des plantes avec *Pythium ultimum* (Figure 8). D'autre part, indépendamment de l'inoculation des sols avec *Pythium ultimum*, une interaction significative a été observée pour la biomasse fraîche et sèche des plantes entre les traitements de biochar et les types de sols (Figure 9). En général, une concentration élevée en biochar a réduit la biomasse sèche des plantes et cet effet a été plus prononcé pour certains types de sols tels que le mélange de sciure, tourbe et compost ainsi que le mélange de tourbe et compost et du loam sablonneux.

Tableau 40. Effets des traitements de biochar, du type de sol et de l'inoculation des milieux de culture par *Pythium ultimum* sur la hauteur des plantes et leur biomasse fraîche ou sèche.

	Valeur de P		
	Hauteur de la plante	Biomasse fraîche	Biomasse sèche
Sol	0,0480	0,0001	0,0001
Biochar	0,0004	0,0001	0,0001
Sol * Biochar	0,3357	0,0001	0,0001
<i>Pythium ultimum</i>	0,7445	0,0002	0,0001
<i>Pythium</i> * Sol	0,0305	0,1059	0,0215
<i>Pythium</i> * Biochar	0,3609	0,5031	0,4408
<i>Pythium</i> *Biochar*Sol	0,0875	0,0572	0,2090

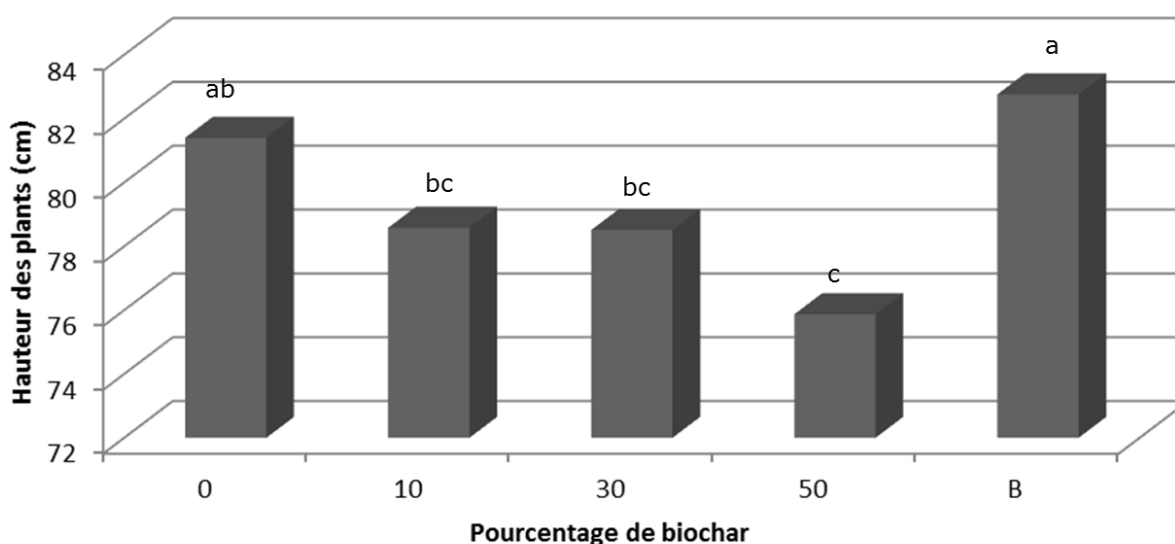


Figure 8. Effet du pourcentage (0, 10, 15, 20, 30 et 50 %; v/v; B=sable témoin) de l'amendement des sols en biochar sur la hauteur des plantes (n = 36). Les valeurs suivies d'une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de $P \leq 0,05$.

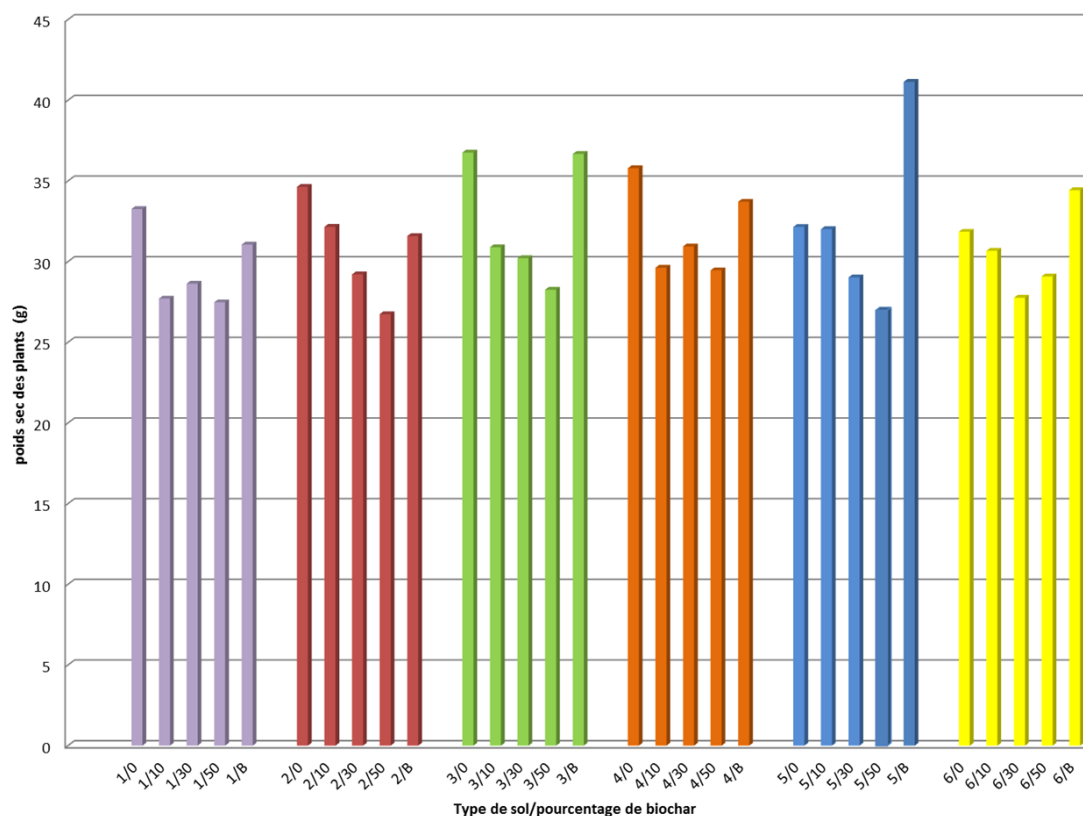


Figure 9. Interaction entre les traitements de biochar (0, 10, 30 et 50 %; v/v; B = sable témoin) et les types de sols sur la biomasse sèche des plantes (n = 6).

D'autre part, un effet significatif de l'inoculation des plantes par *Pythium ultimum* a été observé pour la biomasse fraîche des plantes (sans *Pythium* 114 ± 16 g/plante; avec *Pythium* 108 ± 20 g/plante), peu importe les traitements de biochar ou les types de sols. Par ailleurs, une interaction significative entre le type de sol et l'inoculation des plantes par *Pythium ultimum* a été observée pour la hauteur des plantes et la biomasse sèche. L'inoculation du mélange sciure, tourbe et compost (2) par *Pythium ultimum* a réduit significativement la hauteur des plantes alors que *Pythium ultimum* a eu peu d'effet sur la hauteur des plantes des autres types de sols (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). D'autre part, l'inoculation du sol sableux (1), du mélange sciure, tourbe et compost (2) ainsi que du loam (4) par *Pythium ultimum* a significativement réduit la biomasse sèche des plantes alors qu'aucun effet significatif n'a été observé pour les autres types de sols (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

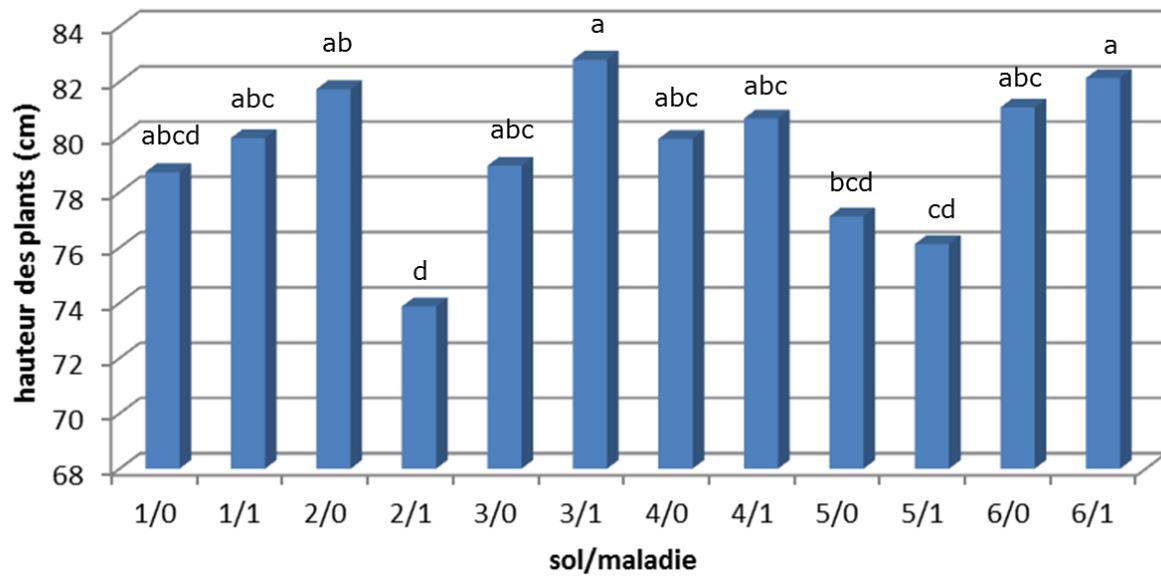


Figure 10. Interaction entre le type de sol et l'inoculation des plantes par *Pythium ultimum* sur hauteur des plants.

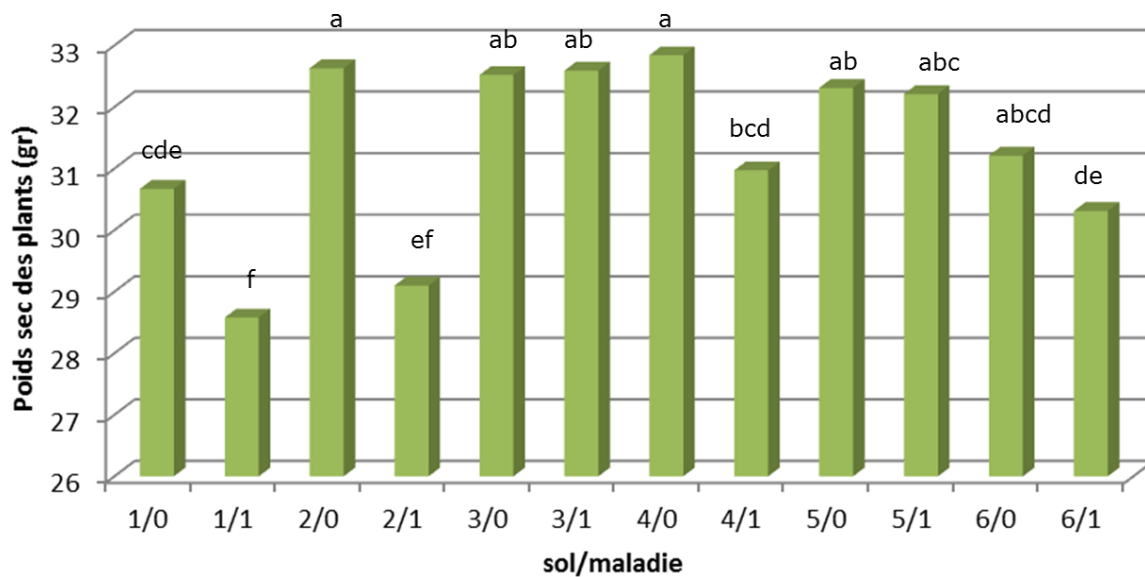


Figure 11. Interaction entre le type de sol et l'inoculation des plantes par *Pythium ultimum* sur la biomasse sèche des plantes.

EXPÉRIENCE 3 – Effets de l’amendement en biochar sur la croissance et le développement de plantes ornementales et maraîchères cultivées en pot

3.4. Croissance et biomasse

L’amendement en biochar n’a pas eu d’effet sur l’accroissement en hauteur des plantes après 5 et 8 semaines de croissance ($P = 0,8177$). Lors du premier échantillonnage (i.e. après 5 semaines), la largeur des plantes n’a pas été affectée par l’ajout de biochar ($P = 0,8973$). Par ailleurs, l’apport de 10 % et 20 % de biochar au milieu de culture a permis d’augmenter proportionnellement la surface foliaire des trois espèces étudiées ($P = 0,0065$). Après 8 semaines de croissance, les géraniums cultivés dans un substrat amendé de 10 % de biochar étaient moins larges et avaient une surface foliaire plus petite (effet cubique; $P = 0,0061$ et $P = 0,0055$, respectivement) que les plantes témoins. Le même effet a été observé pour la surface foliaire du basilic (effet cubique; $P = 0,0065$). Chez le poivron, l’ajout de 20 % de biochar a été la dose la plus bénéfique pour la largeur des plants (effet cubique; $P = 0,0031$), mais cette différence ne s’est pas répercutée sur la surface foliaire des plantes ($P = 0,2804$).

Le diamètre de la tige a été affecté par l’ajout de biochar chez le poivron, le géranium et le basilic après 5 semaines de croissance ($P = 0,0128$; Figure 12). En effet, le diamètre des tiges de toutes les espèces a augmenté de façon linéaire avec l’ajout de 10 et 20 % de biochar. L’apport de 30 % de biochar n’a cependant pas permis d’obtenir un diamètre de tige plus élevé qu’avec l’ajout de 20 % de biochar (diamètre moyen de 5,7, 5,9, 6,2 et 6,0 mm pour le traitement avec 0, 10, 20 et 30 % de biochar respectivement). Pour le basilic, les effets du biochar se sont atténués après 8 semaines de croissance tandis que chez le poivron, ces effets se sont maintenus lors de la seconde évaluation. Dans le cas du géranium, le diamètre de la tige après 8 semaines de croissance a augmenté avec l’augmentation de la teneur en biochar du milieu de culture.

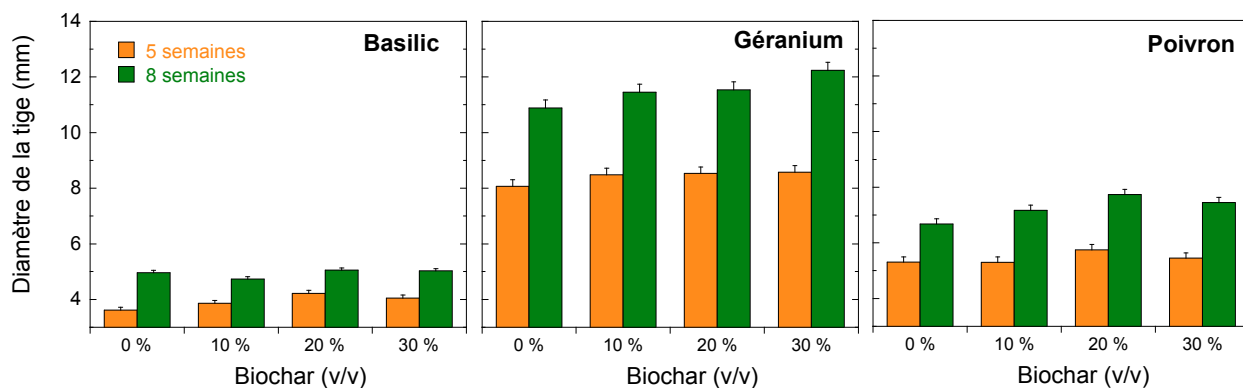


Figure 12. Effets de différentes doses d’amendements en biochar sur le diamètre de la tige (moyenne \pm erreur type) du basilic, géranium et poivron après 5 et 8 semaines de croissance.

La biomasse sèche des plantes a également été mesurée après 5 et 8 semaines de croissance. Lors du premier échantillonnage, la masse sèche des tiges et des feuilles a augmenté avec l’accroissement de la teneur en biochar du milieu de culture ($P = 0,0036$). Cet effet a été plus important chez le géranium et le basilic que chez le poivron (Figure 13). Après 8 semaines de croissance, aucune différence n’a toutefois été observée pour la biomasse sèche aérienne des plantes. D’autre part, après 5 semaines de croissance, l’amendement en biochar n’a pas eu d’impact sur la masse sèche du système racinaire des

plantes ($P = 0,5353$). Par contre, après 8 semaines de croissance, l'amendement du milieu de culture avec 10 % et 20 % de biochar a augmenté la masse sèche des racines de géranium ($P = 0,0181$) par rapport aux plantes témoins. L'ajout de 30 % de biochar n'a toutefois pas conduit à un développement racinaire plus important. Chez le poivron, la dose de 10 % de biochar a été la plus favorable pour la croissance des racines (effet cubique; $P = 0,0623$).

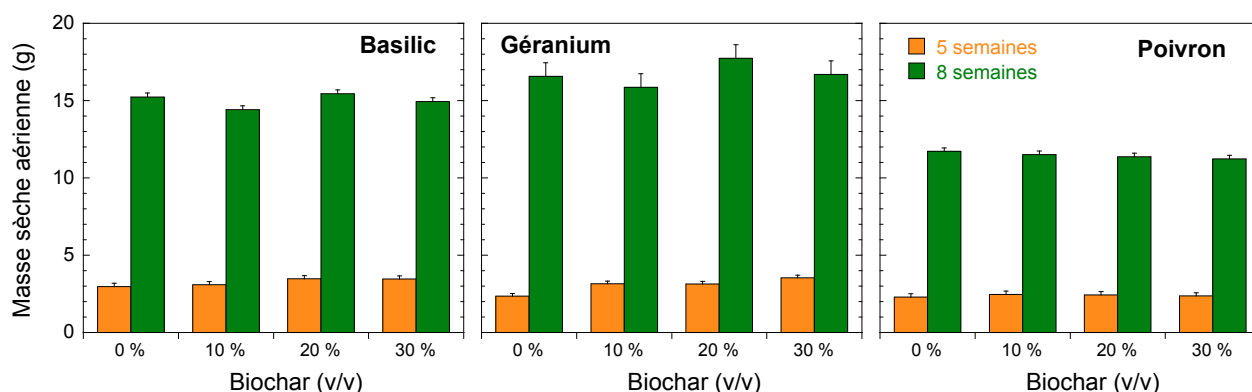


Figure 13. Effets de différentes doses d'amendements en biochar sur la masse sèche des tiges et des feuilles (moyenne \pm erreur type) de plants de basilic, géranium et poivron, évalués après 5 et 8 semaines de croissance.

3.5. Activité biologique du sol

Les traitements de biochar ont diminué l'activité biologique des milieux de culture, exprimée par l'hydrolyse de la FDA, chez le poivron. Cet effet a été proportionnel à la teneur en biochar et n'a été observé que pour le poivron lors des deux périodes d'évaluation (Figure 14; effet linéaire; $P < 0,01$).

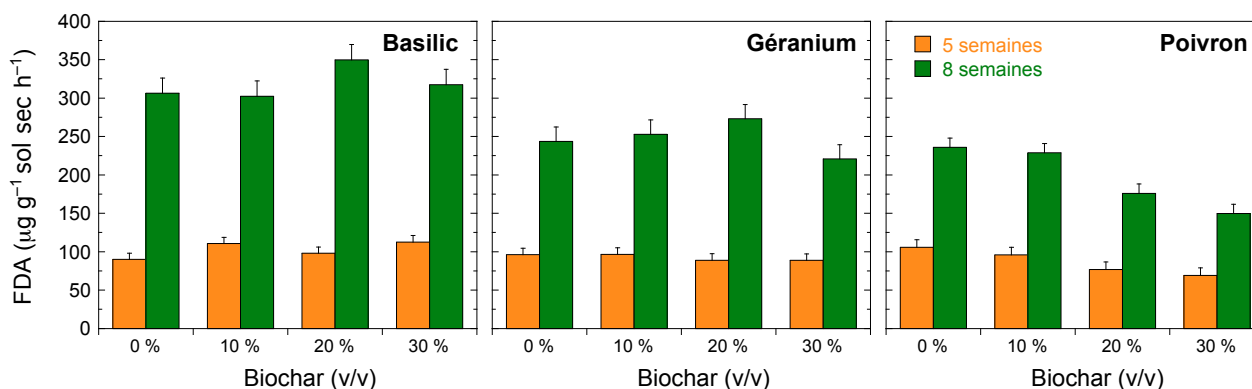


Figure 14. Effets de différentes doses d'amendements en biochar sur l'activité microbienne du substrat mesurée par hydrolyse de la fluorescéine diacétate (FDA) (moyenne \pm erreur type). L'activité biologique des milieux de culture fut évaluée après 5 et 8 semaines de croissance.

3.6. Flux de CO₂

La respiration du sol a été évaluée à deux reprises. Lors de la première évaluation, les flux de CO₂ chez les trois espèces ont été plus faibles dans les pots contenant du biochar. Cet effet a été plus important pour le traitement de 30 % biochar et moins important pour le traitement de 10 % biochar (effet cubique; $P = 0,0440$). Lors de la deuxième période d'évaluation, le biochar a eu un effet inverse pour les flux de CO₂ mesurés dans les pots de géranium contenant 10 et 20 % de biochar (augmentation moyenne de la respiration du sol de 47 % par rapport au traitement témoin). Pour le basilic, les flux de CO₂ ont également augmenté en fonction de la dose de biochar (effet linéaire $P < 0,0001$; Figure 15), alors que chez le géranium, les flux ont chuté drastiquement à 30 % de biochar (effet quadratique; $P = 0,0017$; Figure 15).

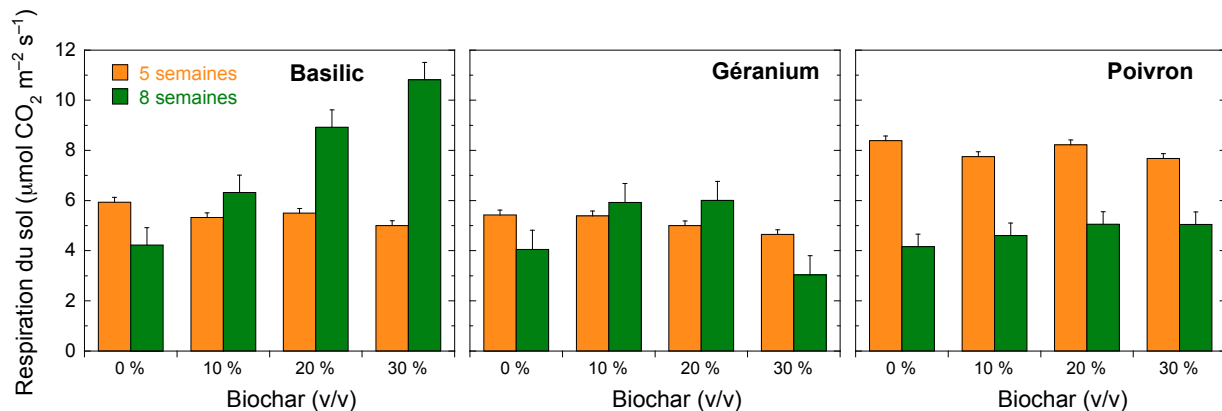


Figure 15. Effets de différentes doses d'amendements en biochar sur la respiration du sol (moyenne \pm erreur type). Les flux de CO₂ émis à la surface des milieux de culture furent évalués après 5 et 8 semaines de croissance.

3.7. Extraction à l'eau

Les quantités de NO₃ et de Mg disponibles à la plante ont varié selon les traitements de biochar (Tableau 41). De manière générale, les concentrations de ces éléments ont été plus faibles dans les substrats avec 10 et 30 % de biochar, par rapport aux traitements de 0 et 20 % de biochar (relation cubique; $P < 0,05$). Chez les trois espèces étudiées, le NO₂ soluble dans le sol a augmenté de façon linéaire, suivant la dose de biochar ajouté ($P = 0,0035$). Les niveaux de PO₄ dans les substrats contenant 10 et 20 % de biochar ont été similaires ou supérieurs à ceux des traitements témoins alors que les substrats avec 30 % de biochar avaient des concentrations en PO₄ significativement inférieures ou égales aux traitements témoins. Pour le Na, l'ajout de 30 % de biochar a réduit la quantité de Na soluble par rapport aux autres traitements (relation quadratique; $P = 0,0073$).

Pour le basilic, l'apport de 10 % biochar n'a pas affecté la quantité de calcium disponible à la plante par rapport aux plantes témoins alors que des concentrations supérieures de biochar ont réduit le Ca disponible aux plantes (Tableau 41; relation quadratique; $P = 0,0358$). Chez le géranium, l'ajout de 10 % et 20 % de biochar a augmenté le Ca disponible aux plantes, alors qu'aucun effet n'a été observé pour une teneur de 30 % (relation cubique; $P = 0,0515$). Pour le poivron, l'ajout de biochar a diminué la disponibilité du Ca (relation linéaire; $P = 0,0034$). L'effet du biochar sur les taux de sulfates a aussi varié selon l'espèce étudiée. Les taux de sulfates des pots de basilic avec 10 % de biochar ont été plus élevés que ceux retrouvés dans les pots avec 20 et 30 % de biochar, mais aucun des traitements n'a été

significativement différent du témoin (relation cubique; $P = 0,0713$). Pour les géraniums, le traitement à 20 % de biochar a augmenté les sulfates par rapport aux trois autres traitements (relation cubique; $P = 0,0556$).

3.8. Lixiviats

Chaque plant de basilic, de géranium et de poivron a reçu respectivement 4,69 L, 4,15 L et 4,24 L de solution nutritive au cours des 8 semaines de culture (à cela s'ajoute $\sim 0,36$ L d'eau d'irrigation reçu durant les fins de semaine). Le lessivage a été plus élevé chez le poivron (1,20 L) que chez les deux autres espèces (basilic : 0,89 L et géranium : 0,91 L), où un effet des doses de biochar a pu être observé (Figure 16). En effet chez le basilic et le géranium, le volume total de solution nutritive lessivée a été significativement inférieur chez les substrats avec 20 et 30 % de biochar comparativement au témoin et à 10 % de biochar ($P < 0,001$). La quantité totale de solutions nutritives lessivées durant l'étude représentait en moyenne 21 %, 23 % et 27 % du volume apporté aux plants de basilic, géranium et poivron du traitement témoin et ceux du traitement avec 10 % de biochar, tandis que cette fraction lessivée était en moyenne de 13,5 % et 18,5 % pour les traitements avec 20 et 30 % de biochar.

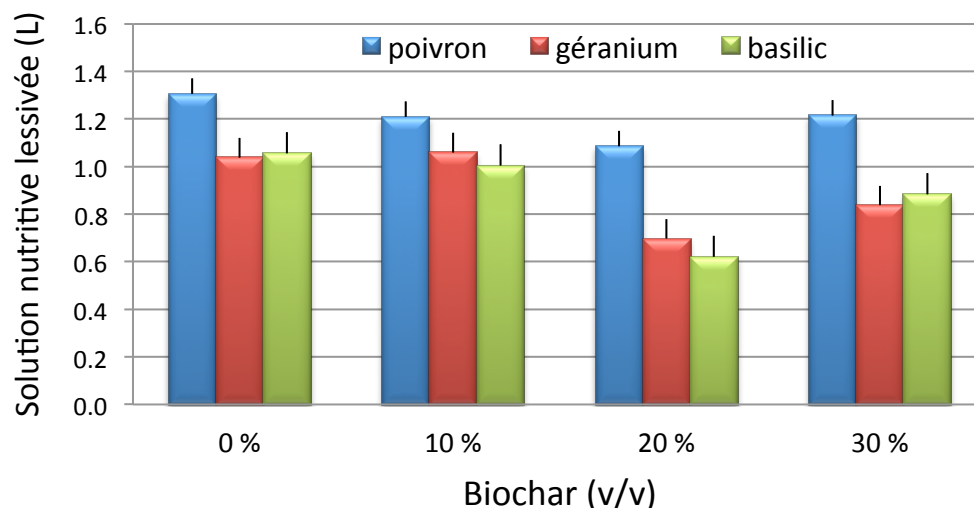


Figure 16. Effets de différentes doses d'amendements en biochar sur le volume total de solution nutritive lessivée durant les huit semaines de croissance en serre.

Pour les trois espèces à l'étude, les concentrations de Ca, SO_4 , Na et Cl mesurées dans les lixiviats ont augmenté à mesure que la dose de biochar passait de 0 à 20 %, puis a diminué pour les substrats amendés de 30 % biochar (Tableau 42; effet cubique; $P < 0,05$). Les niveaux de NO_3 , NO_2 et Mg n'ont pas été affectés par l'amendement en biochar ($P > 0,10$). Il est intéressant de noter que les concentrations en NO_3 et NH_4 ont été très faibles ou non détectables dans les lixiviats. Il est possible qu'il y ait eu dénitrification dans les échantillons conservés à 4°C durant une semaine (cf. Wertz et coll. 2013), ce qui pourrait expliquer les faibles concentrations en NO_3 dans les lixiviats (des analyses additionnelles seront effectuées ultérieurement afin de vérifier cette hypothèse). Pour le basilic, le biochar a eu un effet significatif sur les niveaux de PO_4 . En fait, le traitement de 20 % biochar a résulté en de plus fortes concentrations par rapport aux traitements de 0 et 10 % biochar, suivi par le traitement de 30 % biochar.

Tableau 41. Concentrations minérales (mg kg⁻¹) des substrats après extraction à l'eau (1:2) selon l'espèce et la dose de biochar ajoutée.

	Basilic				Géranium				Poivron				Valeur de P			
	0 %	10 %	20 %	30 %	0 %	10 %	20 %	30 %	0 %	10 %	20 %	30 %	ETM ^z	Espèce	Dose	E×D
NO ₃ ⁻	4075,7	2298,5	3264,0	2064,6	3659,6	3414,8	3958,1	2923,1	2632,4	1572,5	2141,6	543,8	371,1	<0,0001	<0,0001	0,3393
NO ₂ ⁻	33,3	26,0	41,9	56,4	30,1	58,1	49,0	53,5	30,5	50,2	56,7	80,7	12,7	0,2496	0,0293	0,6616
PO ₄ ³⁻	1870,0	1809,2	1920,6	1493,4	1512,0	1855,9	2293,5	1630,5	1999,1	1913,5	2061,2	1686,0	123,1	0,2664	0,0002	0,0857
K ⁺	3816,8	4385,8	3348,0	2777,1	2888,3	3370,4	4121,0	3495,5	3677,1	4152,2	4397,4	3682,9	311,4	0,0590	0,0207	0,0252
Ca ²⁺	774,2	788,2	607,5	437,5	604,1	668,1	824,0	570,2	748,1	697,6	662,3	525,2	54,9	0,8957	<0,0001	0,0027
Mg ²⁺	1055,6	1037,4	981,2	796,0	1029,8	1005,0	1277,2	990,9	767,7	673,8	708,4	497,2	86,9	<0,0001	0,0054	0,2556
SO ₄ ²⁻	6160,7	7897,7	4617,6	3412,3	3900,7	5080,6	6697,3	5097,6	5344,4	6117,5	6065,6	4880,4	712,2	0,6939	0,0133	0,0080
Na	838,7	1014,7	752,5	622,7	668,2	745,6	883,5	765,7	841,4	965,0	972,4	857,7	85,4	0,0310	0,0478	0,0880
Cl	893,9	1096,3	801,8	675,4	572,5	687,2	876,9	794,8	703,5	817,3	885,2	744,6	78,3	0,0622	0,0517	0,0124

^z Écart-type de la moyenne.

Tableau 42. Concentrations minérales (µg ml⁻¹) des lixiviats selon l'espèce et la dose de biochar ajoutée au substrat.

	Basilic				Géranium				Poivron				Valeur de P			
	0 %	10 %	20 %	30 %	0 %	10 %	20 %	30 %	0 %	10 %	20 %	30 %	ETM ^z	Espèce	Dose	E×D
NO ₃ ⁻	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,5653	0,1106	0,7458
NO ₂ ⁻	11,0	10,7	16,5	13,8	11,9	13,4	13,1	10,5	11,0	11,7	11,1	10,4	1,7	0,2598	0,3581	0,3505
PO ₄ ³⁻	119,5	118,6	170,0	143,3	176,6	175,1	174,2	153,3	171,6	196,9	202,8	184,1	9,8	<0,0001	0,0106	0,0312
K ⁺	615,4	625,9	877,2	858,3	775,1	856,4	895,2	862,1	737,6	836,0	999,0	934,7	69,4	0,0211	0,0011	0,6289
Ca ²⁺	98,8	92,1	118,8	105,3	148,3	139,3	142,6	124,9	124,6	130,6	133,9	113,9	6,8	<0,0001	0,0299	0,1533
Mg ²⁺	85,7	82,9	93,7	101,0	132,6	135,9	123,8	114,0	93,8	99,2	105,9	99,1	6,8	<0,0001	0,9096	0,0915
SO ₄ ²⁻	940,3	902,4	1335,4	1234,9	1463,8	1469,8	1618,2	1460,2	1175,9	1304,4	1472,7	1347,7	9,8	<0,0001	0,0128	0,6438
Na	117,9	117,1	183,1	173,1	208,9	227,1	252,8	218,8	157,5	177,9	217,0	193,5	20,6	<0,0001	0,0082	0,8155
Cl	132,2	133,1	244,3	218,9	142,1	179,6	224,1	179,3	155,7	188,2	246,1	225,8	24,5	0,3116	<0,0001	0,6626

^z Écart-type de la moyenne.

3.9. Évaluation de la présence de mycorhizes

L'ajout de 10 % à 30 % de biochar à un substrat biologique contenant 10 % de compost et un inoculant endomycorhizien n'a pas eu d'effet négatif sur la colonisation des racines de basilic et géranium par les mycorhizes par rapport au substrat témoin (Tableau 43). Toutefois, la fréquence d'observation des mycorhizes était nettement inférieure chez le poivron où une concentration élevée en biochar (20 et 30 %) a eu un impact sur la présence de mycorhizes.

Tableau 43. Fréquence d'observation (%) des mycorhizes sur les racines de poivron, géranium et basilic à la fin de la culture (n=5).

Traitement (Trt)	Espèce		
	Poivron	Géranium	Basilic
90 % terreau + 10 % compost + 0 % biochar	60	100	100
80 % terreau + 10 % compost + 10 % biochar	60	100	100
70 % terreau + 10 % compost + 20 % biochar	40	80	100
60 % terreau + 10 % compost + 30 % biochar	40	100	100
Moyenne	50	95	100

4. Discussion et conclusion

Bien que les bénéfices agronomiques et environnementaux de l'utilisation du bio-charbon soient connus depuis longtemps (Ladygina et Rineau, 2013), le biochar est encore peu utilisé en horticulture et encore moins pour les cultures biologiques en serre. Par ailleurs, l'ajout de biochar au milieu de culture peut être une voie prometteuse pour accroître la durabilité et la productivité des cultures biologiques en serre et des plantes cultivées en pots (c.-à-d. transplants, plantes ornementales, plantes pérennes en pépinière). En effet, plusieurs études ont observé que l'amendement en biochar des sols augmente les propriétés biologiques et physico-chimiques de différents types de sols en favorisant le développement des populations microbiennes et les taux de minéralisation du sol, en améliorant la porosité ainsi que l'agrégation des particules et la structure du sol, et en augmentant la capacité d'échange d'ions (cations et anions). L'apport de biochar au sol permet également la réduction des pertes d'éléments nutritifs dans les eaux de drainage et minimise généralement les émissions de gaz à effet de serre tels que le N_2O et CO_2 suite à une meilleure activité biologique et séquestration des gaz (Harter et coll., 2014). Cet effet peut également s'expliquer par une altération de l'activité enzymatique ainsi qu'une plus grande efficacité d'utilisation du carbone et des nutriments par les microorganismes du sol (Case et coll., 2014). D'autre part, l'apport de biochar au milieu de culture à base de compost permet d'accroître leurs propriétés physico-chimiques (Zhang et coll., 2014), constituant ainsi une alternative à l'utilisation de la tourbe (Steiner et Harttung, 2014).

Au cours de cette étude, les trois années d'expérimentation en bacs de culture avec les six types de sols ont démontré que l'amendement en biochar (10 % et 20 % v/v) des sols a permis d'accroître de façon importante l'activité biologique des sols, ce qui est en accord avec la littérature scientifique. L'ajout de biochar aux sols n'a cependant pas permis d'accroître la mycorhization des racines. Ainsi, nos résultats n'ont pas permis de vérifier les études antérieures voulant que le biochar stimule la colonisation des racines par les mycorhizes (AMF) (Hammer et coll., 2014; Matsubara et coll., 2002; Warnock et coll., 2007). Ceci peut toutefois s'expliquer par une concentration élevée en phosphore et en nutriments des sols. Par ailleurs, l'amendement en biochar des différents types de sols a réduit de façon importante les populations de vers de terre. La taille élevée des particules de biochar (0–150 mm) et leur effet abrasif ont ainsi pu affecter la population de ces derniers.

Lors de la deuxième année d'expérimentation, les sols amendés de biochar avaient une plus grande concentration en éléments nutritifs (NO_3 , K, Mg, P, Mn, Fe, Cu) que les sols témoins. Par ailleurs, pour la deuxième et troisième année de culture, la concentration en ions des solutions du sol a été plus faible pour les sols amendés en biochar que les sols témoins alors que la concentration en NO_3 et Ca des lixiviats a été de 30 % et 20 %, respectivement, plus faible que dans les sols témoins. La CE des lixiviats a également été plus faible pour les sols amendés de biochar. Ces résultats peuvent s'expliquer par une plus forte rétention des éléments nutritifs à la surface du biochar et par conséquent une réduction des pertes d'ions par lessivage. L'amendement des sols en biochar n'a toutefois pas permis de réduire le volume des effluents lorsqu'un même seuil d'irrigation (potentiel matriciel) a été utilisé pour contrôler l'apport d'eau. De plus, l'ajout de biochar n'a pas réduit l'émission de N_2O ni de CO_2 lorsque les apports de fertilisants étaient fréquents (aux deux semaines). Par contre, lors d'une régie de fertilisation aux 4 semaines, l'apport de 10 % biochar a réduit les flux de CO_2 .

Au cours des trois années de culture de tomate, l'amendement en biochar des sols n'a eu aucun effet significatif sur la croissance hebdomadaire des plantes ni sur leur biomasse sèche. Le rendement en fruit n'a pas été influencé par l'apport de biochar au sol. Cependant, les fruits provenant des plantes cultivées dans des sols amendés en 10 % biochar avaient 20 % moins de microfendillement que les fruits des

plantes témoins. Cela pourrait s'expliquer par la grande capacité de rétention en eau du biochar et par conséquent, par une plus faible variation de la quantité d'eau disponible pour la plante (Dorais et coll., 2004).

Contrairement à notre étude antérieure où une concentration de 50 % (v/v) de biochar ajoutée à un milieu de culture à base de tourbe a favorisé la colonisation des racines de poivron, laitue, basilic et géranium par *Pythium ultimum* (Gravel et coll., 2013), nos essais (0 à 50 % biochar, v/v) avec six types de sols biologiques ont eu aucun impact sur la colonisation des racines de tomate par *P. ultimum*. Cette différence de résultats peut s'expliquer par une population indigène de microorganismes plus importante dans les six types de sols biologiques cultivés depuis 2009 par rapport aux plantes cultivées en pots durant 8 semaines et amendés de seulement 10 % de compost (Gravel et coll., 2013). Ainsi, nous pouvons conclure que l'amendement en biochar des différents types de sols étudiés n'a pas favorisé ni empêché la colonisation des racines par *Pythium ultimum*. D'autre part, certaines études ont observé un effet suppressif du biochar sur certaines maladies telluriques et maladies foliaires telles que *Phytophthora* spp. suite à son influence sur l'activation du mécanisme de défense des plantes telle que l'induction de la résistance systémique chez certaines plantes horticoles ou plantes pérennes (Graber et Elad, 2013; Zwart et coll., 2012).

Pour des transplants de tomate cultivés en pots, nous avons observé qu'une concentration de 10 % à 30 % biochar (v/v) n'a pas affecté négativement la croissance des plantes. Par contre, l'utilisation d'une concentration de 50 % a réduit la hauteur des plantes ainsi que la biomasse sèche de la tomate. Pour le géranium, le basilic ornemental et le poivron, l'apport de 0 à 30 % (v/v) de biochar (2–4 mm) à un milieu de culture à base de tourbe n'a pas affecté de façon importante la hauteur des plantes et la biomasse sèche des tiges et des feuilles après 8 semaines de croissance. Similairement, Gravel et coll. (2013) ont observé une réduction de 44 % de la biomasse sèche de laitue lorsqu'un apport de 50 % de biochar (v/v) était ajouté au milieu de culture, alors qu'aucun effet significatif n'a été reporté pour le poivron et le géranium. Steiner et Harttung (2014) ont également observé une réduction de la biomasse fraîche des plantes chez le tournesol miniature lorsque 100 % du milieu de culture était composé de biochar par rapport à un substrat à base de tourbe ou de perlite. Toutefois, aucune différence significative n'a été reportée pour les mélanges de tourbe contenant 25 % et 75 % de biochar (Steiner et Harttung, 2014). Par ailleurs, l'apport de biochar (10 % et/ou 20 %) dans la présente étude a augmenté le diamètre de la tige pour l'ensemble des espèces étudiées (poivron, géranium, basilic ornemental) ainsi que la biomasse racinaire du poivron et du géranium.

Nos résultats ont également démontré qu'un apport de 30 % de biochar au milieu de culture à base de tourbe a permis de réduire la concentration en Ca, SO₄, Na et Cl des lixiviats des cultures en pots par rapport à un apport de 10 % et 20 % alors qu'aucune concentration en NO₃ n'a été retrouvée dans ces eaux de drainage. De plus, un apport de 20 % et 30 % de biochar au milieu de culture à base de tourbe a permis de réduire le volume de lixiviation recueilli. Par ailleurs, l'apport de 30 % de biochar a mené à une réduction des flux de CO₂ du sol au cours des premières semaines de culture, tel qu'observé par Gravel et coll. (2013). L'activité microbienne des sols n'a toutefois pas été augmentée par l'apport de biochar, contrairement à nos trois cultures de tomate effectuées dans six types de sols. Suite à ces résultats, on peut conclure que le biochar pourrait être utilisé comme substitut à la tourbe jusqu'à une concentration de 20 % à 30 % (v/v) pour les cultures en pots afin d'améliorer les propriétés des milieux de culture et réduire l'utilisation de la tourbe. Pour la culture ornementale de *Calathea insignis*, il a été récemment démontré qu'un apport de 20 % biochar à un milieu à base de résidus verts compostés était optimal pour la croissance des plantes suite à une amélioration de la biomasse microbienne et des propriétés physico-chimiques du milieu de culture tel que l'accroissement du contenu en macro- et microéléments (Zhang et coll., 2014).

Tableau 44. Sommaire des effets de l'amendement en biochar des sols pour les différentes espèces étudiées au cours des trois dernières années. 0 = aucun effet, + = accroissement, – = diminution, nd = non déterminé, na = données à analyser statistiquement.

Variables	Tomate			Cultures en pots			
	Culture 1	Culture 2	Culture 3	Tomate	Poivron	Géranium	Basilic
Hauteur plante	0	0	0	–	0	0	0
Croissance hebdomadaire	0	0	0	nd	nd	nd	nd
Longueur feuille mature	0	0	0	nd	nd	nd	nd
Diamètre de tige	0	0	0	nd	+	+	+/0 ^τ
Surface foliaire	0 [*]	0	0	nd	+/0 ^τ	+/- ^τ	+/- ^τ
Biomasse aérienne	0	0	0	– [*]	+/0 ^τ	+/0 ^τ	+/0 ^τ
Biomasse racinaire	nd	nd	nd	– [*]	0/+ ^τ	0/+ ^τ	0
Capacité photosynthétique	0	0	0	nd	0	0	0
Rendement en fruits	0	0	0	nd	nd	nd	nd
Qualité des fruits	0	+	na	nd	nd	nd	nd
Flux de CO ₂ du sol	0	– ^τ	+	nd	–	–/+ ^τ	–/+ ^τ
GES	nd	–/+ ^τ	nd	nd	nd	nd	nd
Activité biologique (FDA)	+ [*]	+ ^{*,τ}	+ ^τ	0	–	0	0
Mycorhization	nd	0	0	nd	–	0	0
Colonisation des racines par <i>Pythium ultimum</i>	nd	nd	nd	0	nd	nd	nd
Nombre de vers de terre	nd	– ^τ	–	nd	nd	nd	nd
Contenu en ions du sol	0 [§]	+ ^{§,τ}	na	nd	– [§]	– [§]	– [§]
Contenu en ions de la solution du sol	0	0 (–,+) [§]	– ^{τ,§}	nd	nd	nd	nd
CE de la solution du sol	0	0	– ^τ	nd	nd	nd	nd
Contenu en ions des lixiviats	na	– [§]	na	nd	+/0 [§]	+/0 [§]	+/0 [§]
Volume lixiviats	na	na	0	nd	0	–	–

* variable selon le type de sol; ^τ variable selon la période d'échantillonnage (période 1/période 2); [§] variable selon le type d'ion

L'ensemble des résultats obtenus est résumé au Tableau 44. En conclusion, l'enrichissement en biochar de différents types de sols a permis d'accroître l'activité biologique des sols et a réduit l'émission de nutriments via les eaux de drainage ainsi que les flux de CO₂ lorsque les apports de nutriments étaient appliqués de façon mensuelle. D'autre part, l'ajout de biochar aux sols n'a pas eu d'effet suppressif sur la colonisation des racines par *Pythium ultimum*. De même, le biochar n'a pas accru la sensibilité des plantes aux maladies telluriques et n'a pas non plus favorisé la mycorhization des racines. Aucun effet significatif sur la croissance et la productivité de la tomate n'a été observé pour les trois années de culture bien que l'amendement des sols en biochar ait réduit de 20 % les fruits atteints de microfendillement. Par ailleurs, l'apport de biochar a permis d'accroître la biomasse racinaire du géranium et du poivron cultivés en pot ainsi que le diamètre des tiges de toutes les espèces étudiées. L'ajout de biochar comme substrat de culture pour les plantes en pot a également permis de réduire le volume des lixiviats suite à une meilleure rétention en eau. L'ensemble des résultats obtenus suggère qu'une concentration de 20 % à 30 % de biochar au milieu de culture pour des productions légumières ou des plantes cultivées en pot peut constituer une alternative durable pour les plantes horticoles étudiées. Toutefois, puisque le biochar n'a eu aucun effet significatif sur la rétention des cations au cours de cette étude (seuls les nitrates et le calcium ont été moindres dans les eaux de drainage) et qu'aucune augmentation importante du contenu en nutriments des sols ne fut observée, des essais

additionnels sont requis afin de confirmer si le biochar peut représenter une alternative viable à l'utilisation du compost.

REMERCIEMENTS : ce projet a été réalisé grâce à une aide financière accordée dans le cadre du programme *Innovbio* du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

Références citées

- Adam, G. et Duncan, H. (2001). Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 33: 943–951.
- Case, S.D.C., Mcnamara, N.P., Reay, D.S. et Whitaker, J. (2014). Can biochar reduce soil greenhouse gas emissions from a *Miscanthus* bioenergy crop? *GCB Bioenergy*, 6: 76–89.
- Clapperton, J. Site Web Veille aux vers. <https://www.naturewatch.ca/wormwatch/fr/>
- Clapperton, J. (1996). National Sampling Protocols. *Agriculture et Agroalimentaire Canada, University of Lethbridge*.
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). (1990). Légumes de serre: culture sur film nutritif (NFT) sur laine de roche et en milieux tourbeux. *Direction de la coordination scientifique et technique et direction des communications. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec*. ISBN-2-551-12349-6. pp. 17–24.
- Dorais M., Derrmers D.A., van Iepere, W. et Papadopoulos, A.P. (2004). Greenhouse tomato fruit cuticle cracking. *Horticultural Reviews*, 30: 163–184.
- Dorais, M. et Dubé, Y. (2011). Managing greenhouse organic wastes: a holistic approach. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 893: 183–197.
- Dorais, M. et Schwarz, D. (2013). Organic tomato Chapter 11. In: Tomato. Second edition. Crop Production Science in Horticulture Series. E. Heuvelink Ed. CAB International. Wallingford, Oxon, UK. (accepted)
- Gaunt, J. et Cowie, A. (2009). Biochar, greenhouse gas accounting and emissions trading. In: Lehmann, J., Joseph, S. (eds.), Biochar for Environmental Management: Science and Technology. *Earthscan, London*. pp. 317–340.
- Graber, E.R. et Elad, Y. (2013). Biochar impact on plant resistance to disease. In: Biochar and Soil Biota, N. Ladygina and F. Rineau editors, CRC Press, Taylor & Francis Group, FL, pp. 41–67.
- Gravel, V., Ménard, C. et Dorais, M. (2009). *Pythium* root rot and growth responses of organically grown geranium plants to beneficial microorganisms. *HortScience*, 44: 1622–1627.
- Gravel, V., Ménard, C., Dorais, M., et Pepin, S. (2011). Greenhouse tomato plant development under organic growing conditions: a case study of six organic soils. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 915: 83–89.
- Gravel, V., Dorais, M., et Ménard, C. (2013). Biochar used in combination with organic fertilization for potted plants: its effect on growth and *Pythium* colonization. *Canadian Journal of Plant Science*, 93: 1217–1227.
- Hammer E.C., Balogh-Brunstad Z., Jakobsen I., Olsson P.A., Stipp S.L.S. et Rillig M.C. (2014). A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. *Soil Biology & Biochemistry*, 77:252–260.
- Harter, J., Krause, H.-M., Schuettler, S., Ruser, R., Fromme, M., Scholten, T., Kappler, A. et Behrens, S. (2014). Linking N₂O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community. *International Society for Microbial Ecology Journal*, 8: 660–674.
- Ladygina, N. et Rineau, F. (2013). Biochar and soil biota. CRC Press, Taylor & Francis Group, FL, p. 278.
- Lehmann, J. et Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management – *Science and Technology*. Earthscan, London. 405 p.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C. et Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 1812–1836.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Thies, J., Luizão, F.J., Petersen, J. et Neves, E.G. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 1719–1730.
- Matsubara, Y., Hasegawa, N. et Fukui, H. (2002). Incidence of fusarium root rot in asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus as affected by several soil amendments. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 71: 370–374.
- Maynard, D.G. et Kalra, Y.P. (1993). Chapter 4: Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen. *Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science*. pp. 25–27.
- Mehlich, A. (1984). Mehlich III soil extractant: A modification of Mehlich II extractant. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*. 15: 1409–1416.

- Nichols, M.A. et Savidov, N.A. (2009). Evaluation of greenhouse substrates containing zeolite. *Acta Horticulturae*. (ISHS) 843: 297–302.
- Pepin, S., Dorais, M. et Gravel, V. (2011). Rapport final: Réduction des émissions de fertilisants dans l'environnement et accroissement de la vitesse des échanges d'éléments nutritifs par une régie optimale d'irrigation de la tomate de serre biologique. *Université Laval (Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation)*. 32 p.
- Phillips, J.M. et Hayman, D.S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*. 55: 158–161.
- Rochette, P. et Bertrand, N. (2008). Soil-surface gas emissions. In: Soil sampling and methods of analysis (eds M. Carter and E.G. Gregorich). *CRC Press, Boca Raton, FL*. pp. 851–861.
- SAS Institute. (2011). *SAS 9.3 Output Delivery System: User's Guide*. SAS Institute.
- Schumacher, B.A. (2002). Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments. *Ecological Risk Assessment Support Center (Office of Research and Development)*. pp. 1–23.
- Sharkey, T.D., Bernacchi, C.J., Farquhar, G.D. et Singsaas, E.L. (2007). Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C₃ leaves. *Plant, Cell and Environment*, 30: 1035–1040.
- Sonneveld, C. et Voogt, W. (2009). Plant Nutrition of Greenhouse Crops, 1. *Springer Science and Business Media B.V.* pp. 1–11. (doi 10.1007/978-90-481-2532-6_1, C)
- Steinbeiss, S., Gleixner, G. et Antonietti, M. (2009). Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*. 41: 1301–1310.
- Steiner, C. et Harttung, T. (2014). Biochar as a growing media additive and peat substitute. *Solid Earth* 5: 995–999.
- Thies, J.E. et Rillig, M. (2009). Characteristics of biochar: biological properties. In: Lehmann, J., Joseph, S. (eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. *Earthscan, London*. pp. 85–105.
- Thornley J.H.M. (1976). *Mathematical models in plant physiology*. Academic Press, New York, NY, USA.
- Voogt, W. (1999). Water and mineral balances of organically grown vegetables under glass. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 506: 51–57.
- Voogt W., de Visser P.H.E., van Winkel A., Cuijpers W.J.M. et van de Burgt G.J.H.M. (2011). Nutrient management in organic greenhouse production: navigation between constraints. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 915: 75–82.
- Warnock, D.D., Lehmann, J., Kuyper, T.W. et Rillig, M.C. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant and Soil*. 300: 9–20.
- Wertz S., Goyer C., Zebarth B.J., Burton D.L., Tatti E., Chantigny M.H. et Filion M. (2013). Effects of temperatures near the freezing point on N₂O emissions, denitrification and on the abundance and structure of nitrifying and denitrifying soil communities. *FEMS Microbiological Ecology*, 83: 242–254.
- Zhang, L., Sun, X., Tian, Y. et Gong, X. (2014). Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant *Calathea insignis*. *Scientia Horticulturae*, 176: 70–78.
- Zwart, D.C. et Kim, S.-H. (2012). Biochar amendment increases resistance to stem lesions caused by *Phytophthora* spp. in tree seedlings. *HortScience*, 47: 1736–1740.

5. Biens livrés

- Suivi de l'effet de l'apport de biochar (10% et 20\$, v/v) à six types de sol biologique durant trois années de culture de la tomate de serre
- Évaluation de l'ajout du biochar sur les propriétés physico-chimiques de six types de sol
- Évaluation du biochar sur la capacité de rétention des éléments nutritifs dans six types de sol biologique
- Évaluation du biochar sur l'activité biologique de six types de sol biologique
- Évaluation des effets du biochar sur la croissance des plantes, le rendement, la qualité des fruits et la tolérance des plantes à l'égard des maladies, et ce, pour six types de sol biologique
- Évaluation du biochar sur les émissions des GES
- Évaluation des avantages et désavantages de l'ajout de biochar et de leur impact sur les populations de *Pythium ultimum*
- Évaluation du potentiel d'utilisation du biochar pour les plates cultivées en pots
- Détermination de l'apport optimal en biochar des sols en fonction des espèces étudiées
- Formation de deux étudiants à la maîtrise, d'une étudiante de 1^{er} cycle (stage de recherche – Étude de cas) et de plusieurs étudiants de 1^{er} cycle (assistants de recherche)
- Présentation des résultats à l'échelle provinciale, nationale et internationale
- Au moins trois publications scientifiques seront soumises au cours de l'année en cours et un article de vulgarisation sera publié.

6. Diffusion des résultats

- Dorais M., C. Martinez, M. Diop, M. Thériault, C. Ménard and S. Pepin. Assessing the potential of biochar as a growing media component for potted plants. ISHS INNOHORT symposium will be held on 8-12 June 2015, Avignon University, France
- Dorais M. et coll. 2014. Environmental health through sustainable and organic protected horticulture production of fruits and vegetables. CSA & CSHS Joint Annual Conference 2014: Balancing the Trade Off Between Productivity and Environmental Health. July 11, Lethbridge, AB, Canada.
- Dorais M. 2014. Organic Research Activities on Protected Crops: an Overview. Organic Alberta Association. July 9, 2014. Lethbridge, AB, Canada.
- Dorais M. et coll. 2014. Utilisation du biochar pour la production horticole sous serre. Fertilisants, phytostimulants et biopesticides issus des biomasses marines et agricoles. Atelier biotechnologique, BioMar-Innovation, Collège de Sainte-Anne-de-la-Pocatière, La Pocatière, 28 mai 2014.

- Ménard, C. et coll. 2014. Amendement de sols biologiques avec du biochar: activité biologique et productivité. Devenir du Biochar : Opportunités agricoles et environnementales. Colloque au pavillon Alphonse-Desjardins de l'Université Laval, Jeudi 27 février 2014.
- Dorais M., S. Pepin, C. Ménard, E. Fortier, P. Rochette. 2013. Biochar amendment to six types of organic soil: biological activity and tomato productivity. 2nd ISHS Symposium on Organic Greenhouse Horticulture, Avignon, France, October 28–31.

7. Difficultés rencontrées

Aucune difficulté majeure n'a été rencontrée au cours de ce projet. La tuyauterie utilisée sous les bacs pour récolter les lixiviats avait une pente relativement faible pour quelques-uns des 36 bacs. Nous avons donc dû tenir compte de cet effet lors de l'analyse des volumes de lessivat. Ce problème avec la tuyauterie n'a toutefois pas affecté les concentrations minérales des lixiviats provenant des bacs de culture.

ANNEXE 1 – FERTILISATION

Cultures 2012

Fertilisation standard (quantité par bac) :

- 0,125 kg farine de plumes
- 750 ml farine de crevettes (415 g)
- 0,25 L farine d'algues (205 g)

Fertilisation d'appoint

Pour un bassin de 400 L :

- 200 g CaCl_2 (28 % Ca)
- 160 g SulpoMag (0-0-22; 11 % Mg)
- 60 g Sulfates de potassium (0-0-52)

Tableau A. 1. Détails de la fertilisation lors de la culture 2013.

	Quantités des amendements (g)								Converted (mL)
	Compost	Farine de plumes	Farine de crevettes	Algues	Sulfate de K	Sulpo Mag	Gaiagreen 4-4-4	CaCl ₂	
Période 1									
9 mai	0	0	0	0	60	160	0	0	0
5 juin	0	0	0	0	60	160	0	65,8 ^z	0
20 juin	0	125	414	206	60	160	0	0	0
25 juin	0	0	0	0	60	160	0	0	276
28 juin	0	0	0	0	60	160	0	0	276
02 juil	0	0	0	0	60	160	0	0	276
15 juil	0	0	0	0	60	160	0	200	276
17 juil	0	0	0	0	60	160	0	200	276
24 juil	0	0	0	0	60	160	0	200	0
25 juil	0	0	0	0	0	0	0	0	276
29 juil	0	0	0	0	60	160	0	200	0
Période 2									
13 août	0	0	0	0	60	160	0	200	0
21 août	0	125	414	206	0	0	0	0	0
29 août	0	0	0	0	60	160	0	200	0
11 sept	0	125	414	206	0	0	0	0	0
25 sept	0	125	414	206	0	0	0	0	0
10 oct	0	0	0	0	60	160	0	200	0
29 oct	0	125	414	206	0	0	0	0	0
TOTAL	0	625	2070	1030	780	2080	0	1465,8	1656

Tableau A. 2. Détails de la fertilisation lors de la culture 2014.

	Quantités des amendements (g)								Converted (mL)
	Compost	Farine de plumes	Farine de crevettes	Algues	Sulfate de K	SulpoMag	Gaia green 4-4-4	CaCl ₂	
Période 1									
20 juin	70	75	50	125	100	70	0	0	—
17 juil	50	70	45	150	80	120	0	0	—
Période 2									
15 août	0	125	414	32	35	138,7	62	39,3	—
29 août	60	60	0	40	60	138,7	10	0	—
12 sept	50	100	0	33	100	139	0	0	—
26 sept	0	0	0	33	115	0	0	0	—
TOTAL	230	430	509	413	490	606,3	72	39,3	—

Tableau A. 3. Concentrations moyennes en éléments nutritifs (mg kg⁻¹) d'extraits à l'eau (1:2) du compost, du terreau biologique et des milieux de culture avant l'empotage (Expérience 3).

	Compost	Terreau biologique	Substrat d'empotage			
			0 %	10 %	20 %	30 %
NO ₃ ⁻	14694,0	3701,4	2775,4	2448,5	1902,7	1745,7
NO ₂ ⁻	16,6	14,4	15,5	19,3	21,8	19,0
PO ₄ ³⁻	1358,7	1542,4	1042,0	1102,1	1025,8	1075,0
K ⁺	8391,6	3390,9	2774,6	3144,1	2718,0	2846,9
Ca ²⁺	1400,1	701,0	469,8	449,8	413,4	366,9
Mg ²⁺	716,1	305,1	215,2	209,6	193,7	175,5
SO ₄ ²⁻	2354,7	1301,6	1109,4	1481,2	1617,1	1858,3
Na	1903,8	995,1	913,5	996,3	898,8	744,4
Cl	3654,4	1869,6	1596,2	1735,6	1508,8	1384,9

Annexe 2 – Communications scientifiques

1) Biochar amendment to six types of organic soil: biological activity and tomato productivity

M. Dorais^{1*}, S. Pepin², C. Ménard¹, E. Fortier² and P. Rochette³

¹Horticulture Research Centre, Dept. of Plant Science, Laval University, Quebec, QC, Canada G1V 0A6, martine.dorais.1@ulaval.ca

²Horticulture Research Centre, Dept. of Soil and Agri-Food Engineering, Laval University, Quebec, QC, Canada G1V 0A6

³Agriculture and Agri-Food Canada, Soils and Crops Research and Development Centre, Quebec, QC, Canada G1V 2J3

In order to reduce the environmental footprint of greenhouse production systems, high efficient organic growing systems with high yields and low nutrient emission should be achieved. Thus, a year-round greenhouse experiment (150 m²) was conducted in order to study the impact of biochar amendment (10% v/v) on soil biological activity and crop productivity of tomato grown in six organic soils: 1) sandy soil, 2) a mix of peat, sawdust and compost (30:60:10), 3) a mix of blonde peat and compost (90:10), 4) sandy loam, 5) loam, and 6) muck soil. Tomato seedlings (cv Trust grafted on Beaufort) were transplanted in 0.62-m³ raised containers (10 plants per container) within a randomized split plot design with three replicates (2x6x3, 36 e.u.). Results showed that biochar amendment did not have any significant effect ($p < 0.05$) on soil mineral content, soil microbial activity (FDA and CO₂ flux), leaf photosynthetic capacity (CO₂ and light saturation curves), ratio of variable to maximum fluorescence (Fv/Fm), plant growth parameters expressed by leaf, stem and fruit fresh and dry biomass as well as weekly growth resulting in a similar fruit number and yield. Similarly, biochar amendment had little effect on the emission of GHG. However, significant effects were observed among soil types for most of the studied parameters, except for photosynthetic parameters. Characterization of the soil microbial population (pyrosequencing 454) was also conducted to assess the impact of biochar amendment on microbial communities. Results will be discussed in term of the sustainability of using biochar amendment for organic greenhouse tomato.

2^e Symposium ISHS sur l'horticulture biologique en serre (Organic Greenhouse Horticulture), Avignon, France, 28–31 octobre 2013.

2) Assessing the potential of biochar as a growing media component for potted plants

M. Dorais¹, C. Martinez², M. Diop³, M. Thériault¹, C. Ménard¹ and S. Pepin³

¹Agriculture and Agri-Food Canada, Centre de recherche et d'innovation sur les végétaux, Université Laval, Québec, QC, Canada, G1V 0A6
martine.dorais@agr.gc.ca

²Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Université Laval, Québec, QC, Canada G1V 0A6

³Centre de recherche et d'innovation sur les végétaux, Dép. sols et génie agroalimentaire, Université Laval, Québec, QC, Canada G1V 0A6

Adding biochar to growing media can be a promising avenue for increasing the sustainability and productivity of potted organic plants. Indeed, there have been numerous reports that soil amendment with biochar increases the biological and physicochemical properties of different types of soil by promoting the development of microbial populations and soil mineralization rates, by improving porosity, particle aggregation and soil structure, by enhancing ion exchange capacity (cations and anions), by reducing nutrient losses to surface water and by minimizing the emission of greenhouse gases such as N₂O and CH₄. Thus, the goals of this study were 1) to evaluate for six types of organic soil the effect of soil biochar amendments (0 to 50% v/v; particle size of 0-150 mm) on tomato growth and root susceptibility to *Pythium ultimum*, and 2) to evaluate for a peat based substrate the effect of soil biochar amendment (0 to 30% v/v; particle size of 2-4 mm) on plant growth and nutrient use efficiency of sweet pepper, geranium and ornamental basil. Two experiments were conducted in a greenhouse located at Laval University (46°49'N, 71°15'W) in a randomized complete block design with three to five replicates. Regardless the types of soil, our results showed that soil amendments with a high percentage of biochar (50% v/v) decreased tomato plant height and total dry mass when tomato plants were grown on a peat mix growing media and a sandy loam (p<0.05). However, there was no interaction between biochar amendment and soil *P. ultimum* inoculation, thereby suggesting that biochar did not suppress or promote tomato root colonization by *P. ultimum*. In addition, biochar amendment had no significant effect on the root colonization by mycorrhizal fungi. For any studied species and organic soils, no positive effect of biochar soil amendment on plant growth parameters was observed. However, we conclude that a proportion up to 30% of biochar can be used in replacement of peat for organic potted plants without any significant negative effect on plant growth and disease sensitivity.

Symposium ISHS INNOHORT qui aura lieu du 8 au 12 juin 2015 à l'Université d'Avignon en France.