

RAPPORT FINAL

EFFET SUR LES RENDEMENTS DE L'AJOUT D'INOCULUMS MYCORHIZIENS COMMERCIAUX SUR DES SEMENCES ENROBÉES DANS LA CULTURE DE LA CAROTTE NANTAISE EN SOL MINÉRAL EN DÉBUT DE TRANSITION BIOLOGIQUE.



Auteur ou responsable scientifique : CHRISTINE LANDRY, BIOLOGISTE, AGR, PH. D

Collaborateur ou co-auteur : Jonathan Roy, Mylène Marchand-Roy et Julie Mainguy

Rapport présenté à : MAPAQ DRCA

Date : 2020-01-16

Projet IRDA # : 400076



L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable.

Notre vision

En 2016, l'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région (PADAAR) du Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ).

Nos remerciements s'adressent tout d'abord à Mme Chantal Hamel et M. Réjean Desgagnés de l'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) pour la réalisation des analyses de colonisation mycorhizienne. Les auteurs remercient également les participants du projet et reconnaissent également l'appui technique fourni par le personnel de recherche de l'IRDA et du MAPAQ. Des remerciements s'adressent également à l'IRDA qui a fourni une contribution importante dans le cadre de cette étude.

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Christine Landry, agr., Ph.D., Chercheure, IRDA
- Jonathan Roy, agr. MAPAQ direction de Chaudière-Appalaches
- Mylène Marchand-Roy, agr., M.Sc., professionnelle de recherche, IRDA
- Julie Mainguy, agr., B.Sc., professionnelle de recherche, IRDA
- Chantal Hamel, chercheur, AAC
- Réjean Desgagnés, Tech. AAC
- Antoine Lamontagne, Tech. Agricole. IRDA
- Denis Labonté, Tech. MAPAQ
- Thomas Jeanne, M. Sc. IRDA (Laboratoire d'écologie microbienne (LEM))
- Ouvriers, IRDA
- étudiants et stagiaires MAPAQ et IRDA

POUR PLUS D'INFORMATIONS

Christine Landry, chercheure en fertilisation et valorisation des biomasses, IRDA

TEL : 418-643-2380 poste 640

Christine.landry@irda.gc.ca

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction.....	1
2	matériel et méthodes.....	3
2.1	mise en place de l'expérience	3
2.2	dispositif et traitements	3
2.3	échantillonnages et analyses de laboratoire.....	4
3	Résultats et discussion	9
3.1	caractérisation du site et croissance des carottes	9
3.2	rendements finaux	12
3.3	détection de mycorhizes sur les racines et dans le sol.....	16
	Conclusion	19
	Références.....	20
	Annexe.....	21

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Caractérisation du sol à l'étude, printemps 2018 et 2019.....	9
Tableau 2.	Charge du sol en N-NO ₃ et en P soluble aqueux 50 jours après semis ou à la récolte, selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, saisons 2018 et 2019.....	10
Tableau 3.	Biomasse (T ha ⁻¹ base sèche) produite par le feuillage et les racines selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, à la fin des saisons 2018 et 2019.....	11
Tableau 4.	Prélèvements totaux en N, P, K des plants entiers (feuillage + racine) selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, saisons 2018 et 2019.....	11
Tableau 5.	Évaluation du statut nutritionnel à 50 JAS de la carotte selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, saison 2018 et 2019.....	12
Tableau 6.	Rendements totaux et vendables à l'hectare et par plant (base humide) de la carotte selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, saison 2018 et 2019.....	14
Tableau 7.	colonisation mycorhizienne des racines des carottes vendables à la récolte selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, à la fin des saisons 2018 et 2019.....	16

Tableau 8 Identification génétique de la richesse en Glomeraceae au niveau des racelles de carottes et du sol adhérent selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, à la fin des saisons 2018 et 2019.....	18
---	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Installation du système d'irrigation par aspersion dans le dispositif de carotte.	5
Figure 2 Parcelle expérimentale composée de 4 billons espacés aux 0,75 m, avec semis d'un rang simple sur le billon, saison 2018.	5
Figure 3 Schéma du dispositif expérimental, saison 2018.	6
Figure 4 Schéma du dispositif expérimental, saison 2019.	7
Figure 5 Parcelle expérimentale composée de 3 buttes (3 rangs/butte) espacées aux 1,8 m (centre-à-centre), à 2 stades différents pendant la saison 2019.....	8
Figure 6 Exemple de lots de carottes récoltées en 2018 et classées vendables et non vendables selon le traitement (sans inoculant (gauche) et avec inoculant (droite)).	15
Figure 7 Exemple de lots de carottes déclassées en 2019 (trop petites, difformes ou trop grosses) selon le traitement (sans inoculant (gauche) et avec inoculant(droite)).	15
Figure 8 Conditions météorologiques journalières au site d'étude. Les précipitations sont issues du pluviomètre en place au site et les températures maximales et minimales sont issues de la station météorologique St-Bernard (Chaudière-Appalaches), à proximité du site, saison 2018.....	21
Figure 9 Conditions météorologiques journalières au site d'étude. Les précipitations sont issues du pluviomètre en place au site et les températures maximales et minimales sont issues de la station météorologique St-Bernard (Chaudière-Appalaches), à proximité du site, saison 2019.....	21

1 INTRODUCTION

Plusieurs entreprises commerciales vantent les nombreux bienfaits de l'ajout au semis d'inoculum de champignons mycorhiziens qui forment des symbioses avec la majorité des plantes cultivées, tant sur le développement, la nutrition, que le rendement des cultures. Selon l'industrie, cet ajout aurait un impact important sur les rendements de plusieurs cultures en favorisant une meilleure absorption de certains éléments minéraux, principalement le phosphore, mais également l'azote et l'eau, en plus d'augmenter les activités hormonales, de favoriser une meilleure agrégation des sols (production de glomaline) et d'induire une meilleure résistance aux stress (environnementaux et organismes pathogènes). Cette pratique a cependant un coût pour les producteurs et très peu d'études indépendantes, non liées aux fournisseurs, ont été effectuées à ce jour sous les conditions du Québec. De plus, les sols agricoles contiennent déjà naturellement des populations mycorhiziennes, sélectionnées au fil des années en fonction des régies employées et donc très bien adaptées au milieu de culture. Cette étude vise donc à vérifier s'il y a avantage à ajouter des mycorhizes de souche commerciale dans ce contexte.

Selon les fabricants, la présence de l'inoculant directement sur la semence, par enrobage, permettrait aux souches commerciales de devancer les souches indigènes dans l'établissement de la symbiose. Les souches commerciales importées, pour avoir un bénéfice, doivent en effet parvenir à compétitionner les souches indigènes dans la colonisation de la plante hôte. De plus, une fois la symbiose établie, celle-ci doit faire mieux que celle établie par les populations indigènes. À cet effet, les souches commerciales, sélectionnées pour leur efficacité, seraient en mesure de fournir un bénéfice accru à celui des souches indigènes. Par ailleurs, les symbioses mycorhiziennes présenteraient un intérêt particulier en agriculture biologique où elles pourraient présenter plus d'efficacité étant donné les conditions culturales favorisant l'écologie microbienne du sol. La période de transition entre la culture conventionnelle et biologique pourrait même particulièrement bénéficier de l'inoculation de mycorhizes et de leur action puisque certaines populations indigènes auraient été réprimées lors de la période de culture conventionnelle et que les populations destinées à s'installer sous régie biologique ne sont pas encore bien implantées.

Au Québec, on observe actuellement une tendance pour la transition biologique des cultures maraîchères et la région de Chaudière-Appalaches n'y échappe pas (CARTV 2019). En 2019, on y dénombre 57 entreprises en processus de pré-certification et 490 certifiées, un bon de 41 % par rapport à 2015 (CARTV, 2019). À l'échelle canadienne, le Québec compte le plus grand nombre et la plus grande proportion de fermes certifiées par rapport au nombre total d'entreprises agricoles. Cette proportion est de 4 %, ce qui représente près de 30 % de l'ensemble des fermes certifiées canadiennes et la majorité sont spécialisées dans la production végétale (Robitaille et Oulatoude, 2019). Plus spécifiquement pour la carotte, selon CARTV même si seulement 95 ha ont été déclarés en production de carottes biologiques au Québec en 2018, cela représente une augmentation de 300% par rapport à 2015 (CARTV, 2019). Dans cette production, selon les fournisseurs d'intrants, l'ajout de mycorhizes, surtout dans les sols pauvres en mycorhizes, aurait un impact sur la biomasse du feuillage, la vigueur du plant, ainsi que sur l'uniformité d'émergence des plantules.

Objectif général

L'objectif global du projet est de tester si les souches commerciales importées aux semis de la carotte nantaise parviennent à compétitionner les souches indigènes du sol pour coloniser la plante hôte et si, une fois la symbiose établie, celle-ci parvient à faire mieux que celle établie par les populations indigènes, dans un sol en transition biologique.

Objectifs spécifiques

Afin de répondre à l'objectif global, ce projet étudie plus spécifiquement si, suivant l'ajout de mycorhizes commerciales :

- la colonisation racinaire mycorhizienne est bonne ou meilleure que celle en absence d'inoculum;
- si cette colonisation est bien due à la souche commerciale;
- si l'inoculum modifie les quantités de N et P disponibles du sol;
- si l'inoculum entraîne un meilleur développement des plants;
- si l'inoculum améliore le rendement et la qualité des carottes récoltées, et
- si l'ajout de l'inoculant permet une amélioration de la marge de production

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 MISE EN PLACE DE L'EXPÉRIENCE

L'étude s'est déroulée à la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon dans un sol de type loam argileux en transition biologique. Le dispositif expérimental a été implanté deux années consécutives, en 2018 et en 2019, dans 2 champs différents mais à proximité, afin de couvrir deux années de conditions météorologiques. Pour chaque champ, le précédent cultural était un apport de lisier de porc à l'engraisement à un taux de 35 tonnes/ha à la fin juillet, suivi par l'implantation d'un engrais vert formé d'un mélange d'avoine et de pois fourrager, fauché à l'automne et incorporé au printemps suivant, juste avant les semis de carottes. De ce fait, aucun complément d'engrais n'a été apporté pendant la croissance des carottes.

En 2018, un système cultural en rangs, sur petits billons espacés de 0,75 m centre-centre, avec un seul rang de carotte par billon, a été utilisé. Cette configuration a été adoptée à la suite d'une levée difficile dans un système avec planche préalablement envisagé. En effet, des carottes sur planches étaient aussi présentes en 2018 dans le champ mais compte tenu de la levée inégale dû au manque d'eau, les parcelles sur petits billons ont été implantées, ainsi que l'ajout d'un système d'irrigation. En 2019, le système avec planche a alors été implanté avec succès et a donc servi pour les essais. Les planches mesuraient alors 0,75 m de largeur et étaient espacées entre elles de 1,8 m centre-centre et incluaient 3 rangs de carottes par planche. Les planches ont été confectionnées à l'aide d'une butteuse de type Rain-Flo 2600 de Dubois Agrinovation. Les semis ont été réalisés manuellement avec un semoir Jang au taux de 1 semence à tous les 2,5 cm, autant sur les billons que sur les planches. Un système d'irrigation par aspersion a aussi été installé et des irrigations ont été réalisées surtout pendant les premières semaines suivant les semis pour s'assurer d'une levée uniforme (Figure 1). Enfin, des désherbages manuels et mécanisés ont été réalisés hebdomadairement à chacune des années pour éviter tout biais sur la croissance des carottes.

2.2 DISPOSITIF ET TRAITEMENTS

Deux traitements ont été comparés, soit un traitement témoin sans inoculum mycorhizien et un traitement avec inoculum, le tout répété 3 fois (blocs), pour un total de 6 parcelles expérimentales. En 2018, les parcelles expérimentales étaient composées de 4 billons de 10 m de longueur (Figures 2 et 3) alors qu'en 2019, les parcelles faisaient 4,65 m de large X 10 m de long, soit 3 buttes de 0,75 m de large X 10 m de long (3 rangs de carotte/butte), distantes de 1,8 m centre-centre (Figures 4 et 5). Chaque année, les parcelles étaient séparées d'au moins 4 m de la parcelle voisine. De plus, ces allées étaient travaillées mécaniquement sur une base régulière pendant la saison afin de contrôler les adventices et aussi de briser les hyphes des champignons mycorhiziens qui pourraient s'y développer et ainsi prévenir la colonisation des parcelles non-inoculée par les souches commerciales des parcelles voisines.

Au semis, les semences enrobées de carottes nantaises biologique cv. Presto ont été inoculées ou non, avant d'être mises dans la boîte de semis, le 26 juin 2018 et le 10 juin 2019. L'inoculum était une souche d'endomycorhize sous forme de poudre spécifiquement conçue pour les cultures maraîchères (©Agtiv cultures

Spécialisées) de la compagnie Premier Tech. La dose recommandée d'inoculum était de 0,225 g de poudre/1000 semences pour la carotte nantaise. Les semences ont été roulées dans la quantité de poudre afin que toutes soient bien en contact avec le produit, puis le semoir a été calibré selon que les semences étaient inoculées ou non.

Les données ont été traitées par une analyse descriptive incluant la moyenne et son coefficient de variation (CV). Puisqu'il n'y avait que deux traitements dans l'essai et que ceux-ci étaient répétés seulement trois fois, l'ajustement d'un modèle statistique n'était pas approprié. Ainsi, vu le nombre restreint d'observations, toutes les mesures de chaque paramètre ont été présentées sous forme de tableaux. Ceci permet de comparer plus justement les moyennes obtenues en appréciant directement l'écart entre les répétitions d'un même traitement.

2.3 ÉCHANTILLONNAGES ET ANALYSES DE LABORATOIRE

Tous les échantillonnages de sol ont été effectués sur la strate 0-20 cm. Au printemps de chaque année, le sol a été caractérisé dans chacun des réplicas (blocs) (2018 : 26 juin ; 2019 : 10 juin). Cette analyse comprenait le pH_{eau} dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des productions végétales du Québec, 1988). Les contenus en carbone (C_{total}) et azote (N_{total}) totaux mesurés par combustion au LECO. Les ions nitrates (N-NO₃) extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminés par colorimétrie avec un auto analyseur Technicon, ainsi que les éléments totaux P, K, Ca, Mg et Al extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et coll, 1992) et dosés à l'ICP optique. Par la suite, tout au long des deux saisons, le développement (biomasse aérienne et racinaire) des plants de carotte a été suivi à deux stades cibles, soit 30-35 jours après semis (JAS) (émergence du filament racinaire) (2018 : 31 juillet 2019 : 22 juillet) et 55 JAS (période cible du statut nutritionnel) (2018 : 15 août ; 2019 : 14 août). La biomasse sèche des racines et du feuillages a été mesurée sur une section de rang de 50 cm linéaire et le nombre de plants a été dénombrés. De plus, l'analyse du feuillage a aussi été réalisée au stade 55 JAS comme indice nutritionnel. Pour ce faire, la plus jeune feuille pleinement développée a été prélevée sur 30 plants (hors de la zone de rendement) et elles ont été mises à sécher à 65 °C. Par la suite, sur l'échantillon séché, les contenus en C_{total} et N_{total} ont été mesurés par combustion au LECO et les autres éléments totaux P, K, Ca, Mg et Na par digestion à l'acide nitrique (HNO₃ – H₂O₂). Au stade 55 JAS également, le N-NO₃ et le P soluble à l'eau (Sissing 1971) ont été mesurés dans le sol. À chaque échantillonnage de sol, la masse volumique apparente (MVA) a été déterminée afin de pouvoir convertir les concentrations (mg/kg) en charges à l'hectare (kg/ha). Lors de la récolte (environ 90 JAS) (2018 : 27 septembre ; 2019 : 17 septembre), toutes les carottes des 2 rangs centraux sur 2 m linéaires (2018) ou les 3 rangs de la butte centrale sur 2 m linéaire (2019) ont été classées (vendables et non vendables) et pesées. Les carottes étaient classées non vendables si elles étaient trop petites (< 4 po de long), trop grosses (> que 1" ¾) ou difformes/malades. De plus, de septembre à octobre des mesures du degré Brix ont été réalisées. Enfin, des sous-échantillons de la biomasse aérienne et de la biomasse racinaire (plus de 400 g) des zones de rendements ont été séchés à 65 °C et acheminés au laboratoire pour doser leurs contenus totaux en N, P, K, Ca, Mg et ainsi connaître les prélèvements totaux en nutriments par la culture. Des sous-échantillons d'une dizaine de carottes fraîches provenant du lot de carottes vendables ont aussi été utilisés afin d'y prélever 1 g de racelles pour déterminer le taux de colonisation mycorhizienne. Ces

échantillons ont été expédiés à Mme Hamel de AAC et ils ont été analysés par prétraitement dans une solution KOH (10% v:v) et coloration dans une solution encre : vinaigre (5% v:v) (Vierheiling et coll. 1998). De plus, un autre échantillon de 1 g de racines et du sol adhérent a été expédié au Laboratoire d'Écologie Microbienne (LEM) de l'IRDA. Ces échantillons ont été analysés pour la diversité microbienne par séquençage à haut débit afin de déterminer les souches mycorhiziennes présentes (Lumini et coll. 2010). La détection de la souche mycorhizienne commerciale a été spécifiquement évaluée au niveau de la base de données taxonomiques SILVA version 132 (Quast et coll. 2012) dans le processus de traitement bio-informatique des séquences sur la plateforme QIIME2 (Bolyen et coll. 2018).



Figure 1 Installation du système d'irrigation par aspersion dans le dispositif de carotte.



Figure 2 Parcelle expérimentale composée de 4 billons espacés aux 0,75 m, avec semis d'un rang simple sur le billon, saison 2018.

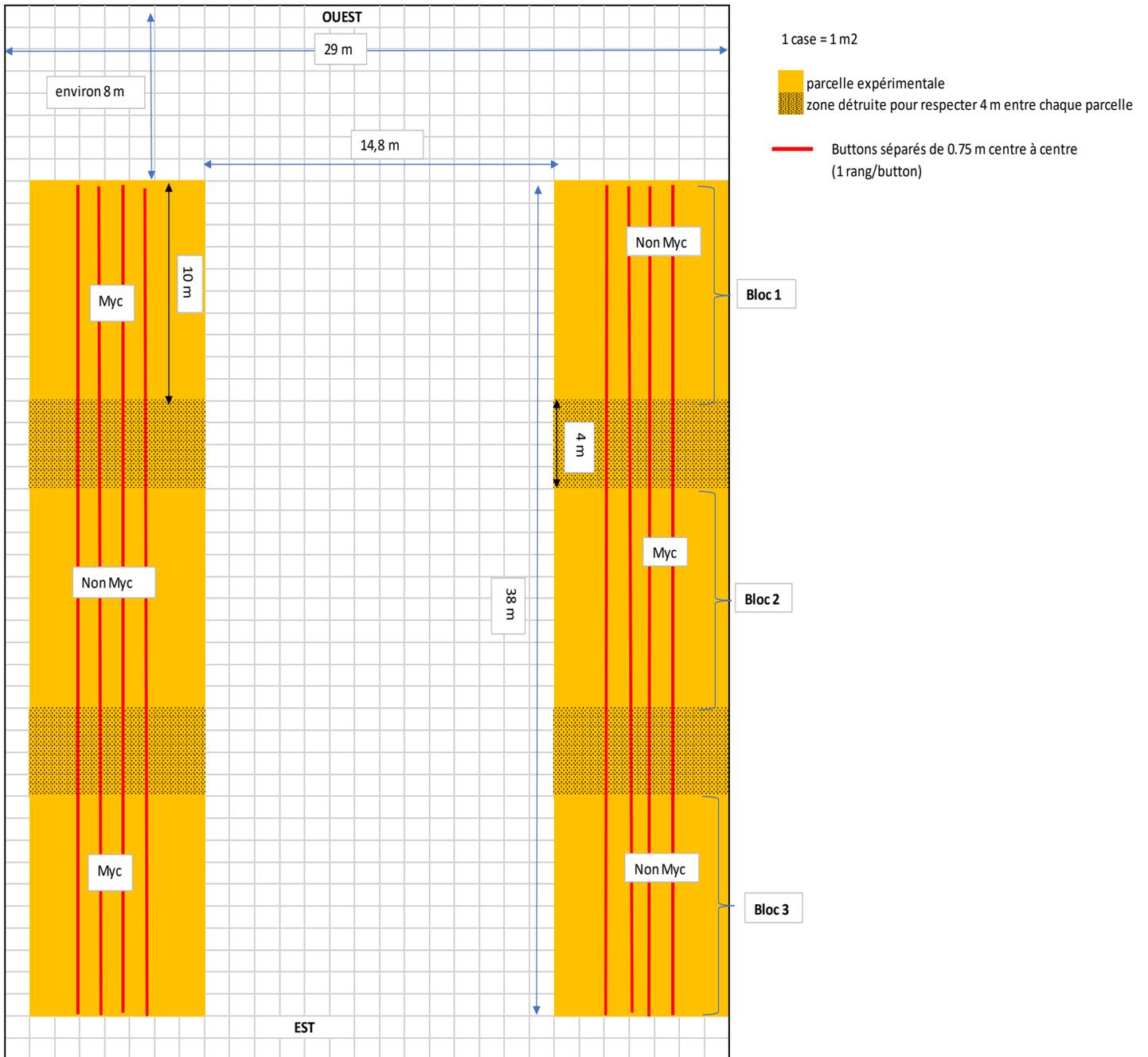


Figure 3 Schéma du dispositif expérimental, saison 2018.

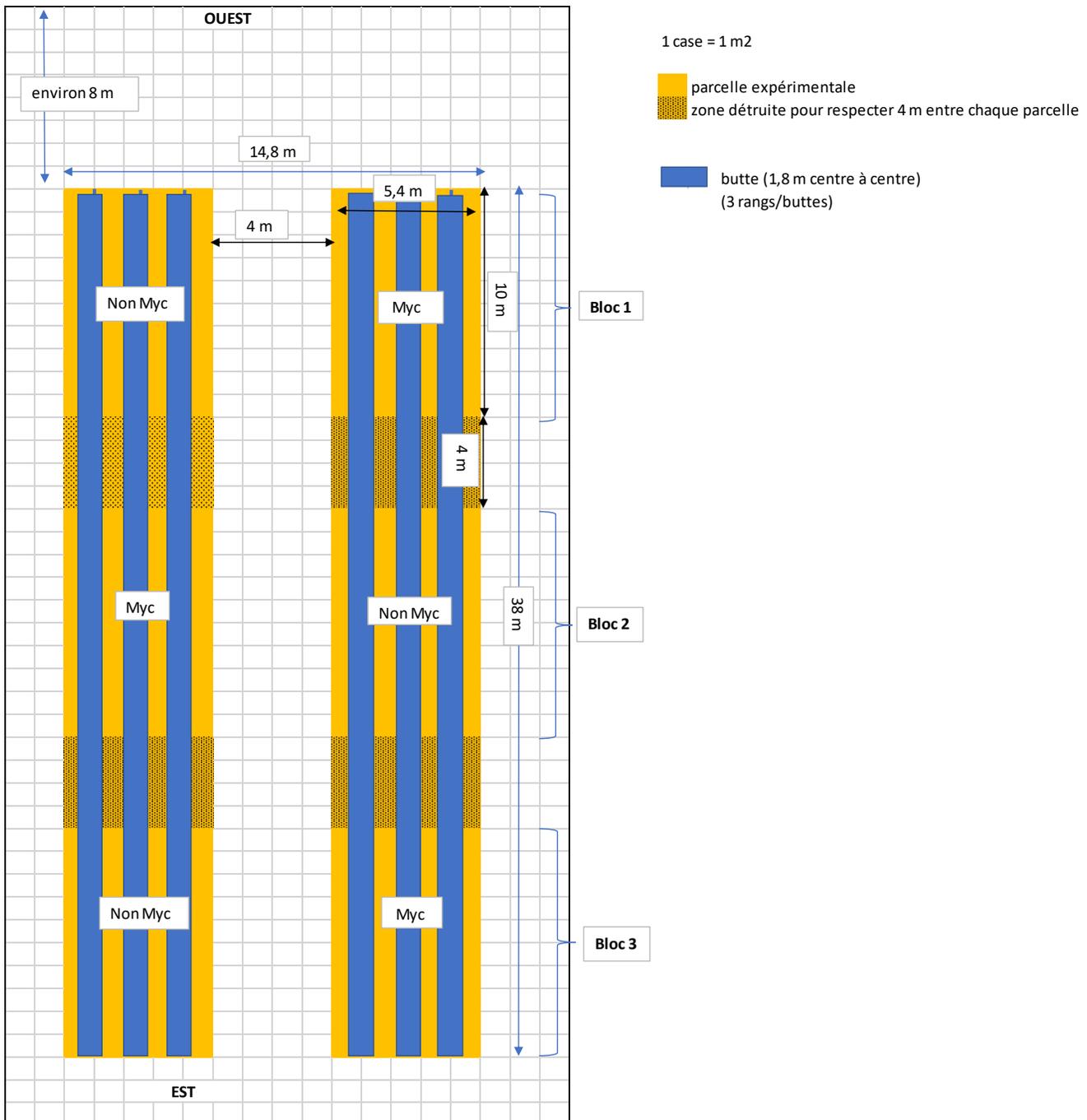


Figure 4 Schéma du dispositif expérimental, saison 2019.



Figure 5 Parcelle expérimentale composée de 3 buttes (3 rangs/butte) espacées aux 1,8 m (centre-à-centre), à 2 stades différents pendant la saison 2019.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 CARACTÉRISATION DU SITE ET CROISSANCE DES CAROTTES

Selon le Guide de référence en fertilisation (CRAAQ 2010), un pH de 6,3 est adéquat pour la croissance de la carotte. Dans les essais, à chaque année les valeurs de pH mesurées au printemps se rapprochaient de cette valeur cible (6,0 à 6,4) (Tableau 1). Le sol était également de fertilité moyenne en P (CRAAQ 2010). Selon le Guide, sur la base de l'analyse de printemps (Tableau 1), des apports moyens de 85 et 105 kg P₂O₅ étaient donc recommandés en 2018 et 2019, respectivement. Toutefois, aucun apport de P autre que ceux provenant du lisier et de l'engrais verts de la saison précédente n'a été fait pour ne pas nuire à la mycorhization. Il est en effet reconnu que les avantages liés à l'inoculation des semences avec les mycorhizes s'exprimeraient tout particulièrement pour l'absorption du P en situation de sol moyen à pauvre en P (Fortin et coll. 2015). La même stratégie a de plus été utilisée pour les autres éléments majeurs (N et K), également prélevables par les mycorhizes, puisqu'il n'y a eu aucun apport supplémentaire de N et de K pendant les deux saisons de croissances de la carotte même si les doses recommandées au printemps étaient de 80 kg N ha⁻¹ et de 120 kg K₂O ha⁻¹ à chaque année (Tableau 1) (CRAAQ 2010).

Tableau 1. Caractérisation du sol à l'étude, printemps 2018 et 2019.

Paramètres	2018			2019		
	REP 1	REP 2	REP 3	REP 1	REP 2	REP 3
pH _{eau}	6,4	6,3	6,2	6,1	6,0	6,3
N-NO ₃ (kg ha ⁻¹ b.s.)	40	35	44	31	31	18
C _{tot} (%)	2,1	2,1	2,0	2,1	2,4	2,4
N _{tot} (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
C/N	13,2	12,5	11,0	11,2	11,6	12,2
Texture	Loam argileux	Loam argileux	Loam argileux	Loam argileux	Loam argileux	Loam argileux
Densité apparente (0-30 cm) (g cm ⁻³)	0,9	0,8	0,9	1,1	1,0	1,1
Éléments majeurs Mehlich-3 (kg ha ⁻¹ b.s.)						
P	219	160	125	132	130	116
K	251	237	135	262	300	241
Ca	3109	3125	2950	2740	2800	3149
Mg	240	233	244	298	280	244
Al (mg kg ⁻¹)	1216	1378	1294	1408	1468	1383
P _{M3} /Al _{M3} (%)	8,1	5,2	4,3	4,2	4,0	3,8

En saison (50 JAS), les analyses de sol ont démontré, autant dans les dispositifs avec semences inoculées ou non, que les charges en N-NO₃ étaient à des niveaux suffisants pour soutenir les besoins nutritionnels de la carotte, malgré l'absence d'apport externe de N pendant la saison. En effet, en mi-saison, les charges moyennes les deux années étaient toujours de 100 et 53 kg N-NO₃ ha⁻¹ en 2018 et 2019, respectivement et les besoins de la carotte

sont estimés à 80 kg N ha⁻¹ pour toute une saison (Tableau 2). Ces niveaux de N disponible ont été probablement soutenus par la minéralisation de l'engrais verts d'avoine et de pois enfoui au printemps de la même année. Cette dernière hypothèse est également renforcée par la mesure des charges résiduelles de N-NO₃ au moment de la récolte, surtout en 2018, avec plus de 22 kg N-NO₃ ha⁻¹ et encore environ 10 kg N-NO₃ ha⁻¹ en 2019. Ainsi dans les deux cas, il y avait encore de l'azote disponible dans le sol en fin de saison alors que la culture avait cessé les prélèvements. L'ajout de mycorhizes aux semis également n'a pas affecté de façon notable les contenus en N et P disponibles du sol en saison. Les variations des contenus en ces éléments étaient davantage influencées par des facteurs de sites, soit des différences entre les réplicas d'un même champ ou d'une année à l'autre, qu'avec l'ajout ou non de l'inoculum mycorhizien (Tableau 2).

Tableau 2. Charge du sol en N-NO₃ et en P soluble aqueux 50 jours après semis ou à la récolte, selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, saisons 2018 et 2019.

	REP	50 JAS (N-NO ₃ kg ha ⁻¹)		50 JAS (P soluble kg ha ⁻¹)		Récolte (N-NO ₃ kg ha ⁻¹)	
		INOCULÉE	SANS	INOCULÉE	SANS	INOCULÉE	SANS
2018	1	78,1	87,8	9,4	11,3	70,6	37,7
	2	95,1	92,4	6,1	5,9	58,9	22,7
	3	125,8	121,4	3,3	6,2	33,4	165,8
	moyenne	99,7	100,5	6,2	7,8	54,3	75,4
	CV	24,2	18,1	49,2	38,9	35,0	104,3
2019	1	42,24	45,84	6,6	10,7	9,45	7,12
	2	68,40	54,00	5,9	5,1	16,13	9,69
	3	47,52	67,68	6,5	6,4	11,34	9,75
	moyenne	52,7	55,8	6,2	7,4	12,3	8,9
	CV	26,2	19,8	6,3	39,8	28,0	17,0

Globalement la croissance (biomasse) aérienne des plants (feuillage) a été comparable avec ou sans inoculum (Tableau 3). Même constat au niveau de la croissance des racines en 2018 toutefois en 2019, davantage de biomasse racinaire a été produite avec le traitement n'ayant pas reçu d'inoculum mycorhizien. Cette différence était 0,7 T ha⁻¹ soit 21 % de plus (Tableau 3). En fin de saison, il est donc logique de constater que grâce à des niveaux comparables de fertilité du sol et de conditions de croissance (voir conditions météo en annexe : Figures 8 et 9), avec ou sans l'ajout de mycorhizes, des prélèvements totaux (feuillage + racines) similaires en N, P et K par les plants ont été obtenus les deux saisons (Tableau 4). En 2018, les prélèvements en ces éléments ont été quasi identiques entre les deux traitements. En 2019, puisque qu'une biomasse plus importante de racine a été produite dans le traitement sans inoculum, il est logique de trouver des prélèvements en N plus importants de 18 %. Les prélèvements en P et K étaient également plus importants dans le traitement sans inoculum cette année-là, de 12 % et 11 % respectivement (Tableau 3).

Tableau 3. Biomasse (T ha⁻¹ base sèche) produite par le feuillage et les racines selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, à la fin des saisons 2018 et 2019.

	REP	Feuillage		Racines (carottes)	
		INOCULÉE	SANS	INOCULÉE	SANS
2018	1	1,4	1,6	4,5	5,3
	2	1,2	1,5	4,5	4,8
	3	1,6	1,1	4,0	3,5
	moyenne	1,4	1,4	4,3	4,5
	CV	12,9	16,7	14,2	
2019	1	1,3	1,3	3,4	3,9
	2	1,3	1,5	3,4	4,1
	3	1,3	1,5	3,1	4,0
	moyenne	1,3	1,4	3,3	4,0
	CV	3,2	6,0	4,8	1,7

Tableau 4. Prélèvements totaux en N, P, K des plants entiers (feuillage + racine) selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, saisons 2018 et 2019.

	REP	N total		P total		K total	
		INOCULÉE	SANS	INOCULÉE	SANS	INOCULÉE	SANS
2018	1	96,3	115,3	22,5	24,6	120,8	179,6
	2	94,9	102,3	21,3	24,5	144,2	132,2
	3	115,3	87,8	21,0	19,1	61,0	55,8
	moyenne	102,2	101,8	21,6	22,7	108,7	122,5
	CV	11,2	13,5	3,7	13,8	39,5	51,0
2019	1	63,41	65,97	10,25	11,85	69,93	68,69
	2	71,05	82,31	11,57	12,23	62,56	85,93
	3	65,13	86,98	10,69	12,34	73,79	74,02
	moyenne	66,5	78,4	10,8	12,1	68,8	76,2
	CV	6,0	14,1	6,2	2,1	8,3	11,6

L'évaluation du statut nutritionnel du feuillage des carottes a montré encore une fois qu'il n'y a aucun effet de l'inoculation mycorhizienne commerciale sur les teneurs foliaires, bien que les niveaux mesurés soient sous la valeur minimale critique (VMC) (Tableau 5) pour le N et P à chaque année, et pour le K en 2018. Ces carences sont surprenantes car le sol contenait des charges adéquates en ces éléments (Tableau 2). Ceci pourrait s'expliquer par le cultivar utilisé puisque les VMC références n'ont pas été établies avec le même cultivar que

celui de l'essai et qu'il est reconnu que les carottes vont avoir par exemple des besoins en N différents selon le cultivar (CRAAQ 2010). Toutefois le ratio P/N obtenu avec les valeurs théoriques du VMC était égal à $0,5/4,8 = 0,10$ soit similaire à celui concrètement obtenu sur le terrain $0,3/3,6 = 0,08$ ce qui mène à penser que l'équilibre entre les 2 éléments a été atteint.

Tableau 5. Évaluation du statut nutritionnel à 50 JAS de la carotte selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, saison 2018 et 2019.

REP		N (%)		P (%)		K (%)		Ca (%)		Mg (%)	
		INOCULÉE	SANS	INOCULÉE	SANS	INOCULÉE	SANS	INOCULÉE	SANS	INOCULÉE	SANS
2018	1	3,3	3,7	0,29	0,27	2,7	2,5	1,6	1,8	0,41	0,46
	2	3,6	3,7	0,28	0,28	3,1	1,8	1,6	1,7	0,42	0,47
	3	3,5	3,8	0,31	0,32	1,2	1,4	1,5	1,6	0,45	0,51
	Moyenne	3,5	3,7	0,29	0,29	2,3	1,9	1,6	1,7	0,43	0,48
	CV	3,9	1,5	6,2	8,2	42,3	28,2	1,9	6,5	4,5	6,2
2019	1	3,0	3,0	0,34	0,29	3,2	2,5	0,9	1,4	0,32	0,36
	2	3,0	3,4	0,26	0,29	3,2	3,3	1,4	1,3	0,37	0,37
	3	3,0	3,3	0,36	0,33	3,5	3,2	1,1	1,2	0,29	0,33
	Moyenne	3,0	3,2	0,32	0,30	3,3	3,0	1,1	1,3	0,33	0,35
	CV	1,4	6,7	16,4	7,1	5,1	14,1	23,5	6,6	12,8	5,4
VMC¹		4,8		0,50		3,3		1,3		0,30	

¹ CRAAQ 2010

3.2 RENDEMENTS FINAUX

Finalement, les rendements totaux en carottes ont été légèrement différents entre les deux traitements en 2018 avec 6 % (3 T ha^{-1}) de plus produites avec le traitement sans inoculum. Cet avantage s'est également maintenu au niveau des rendements vendables (Tableau 7). En 2019, les différences sont plus marquées avec 14 % ($5,2 \text{ T ha}^{-1}$) de plus de carottes pour les parcelles sans inoculum, en comparaison du traitement avec inoculant mycorhizien. Après classement, la différence augmente à 14 % (8 T ha^{-1}) de plus de carottes vendables récoltées dans les parcelles des carottes non inoculées. Différentes pistes peuvent expliquer ces résultats. D'une part, un nombre inférieur de plants a été dénombré au stade 30 JAS dans les parcelles avec inoculum en 2018, tout comme en 2019, pour une superficie comparable. Cette différence est demeurée la même jusqu'à la récolte (Nb. de plants ha^{-1} ; Tableau 7). Le calibre des carottes s'en est donc trouvé affecté tel que présenté dans le Tableau 7. En effet, si les valeurs de rendements sont rapportées en g/plant, les carottes des traitements inoculés avaient tendance à être plus grosses que celles du traitement sans inoculant (Tableau 7 et Figure 6). Il n'est toutefois pas possible de conclure si cette différence est due à l'inoculum ou si la plus faible densité de

carottes sur le rang a permis la production de carottes avec un plus gros calibre. Ceci peut également expliquer pourquoi davantage de carottes de trop gros calibre ont dû être déclassées dans le traitement avec inoculum en 2019. Il se peut que le nombre inférieur de plants dans les parcelles avec inoculant soit dû à un fonctionnement moins adéquat du semoir à cause de la poudre pouvant obstruer le mécanisme même si la calibration a été vérifiée. Toutefois autant en 2018 qu'en 2019, davantage de carottes difformes ont été dénombrées dans les lots de carottes avec inoculum contrairement à celles n'ayant pas reçu l'inoculum soit 13 % vs. 10 % en 2018 et 23 % vs. 16 % en 2019 (Tableau 7 et Figures 7). Cette observation mériterait d'être davantage explorée dans le future pour confirmer si l'inoculant peut provoquer davantage de difformité aux carottes. Autrement l'évaluation du taux de sucre (Brix) n'a pas révélé de différence selon que les semences avaient reçu ou non l'inoculum (données non montrées).

Tableau 6. Rendements totaux et vendables à l'hectare et par plant (base humide) de la carotte selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, saison 2018 et 2019.

REP		Rendement total ha ⁻¹ (b.h.)						Rendement vendable ha ⁻¹ (b.h.)					
		INOCULÉE			SANS			INOCULÉE			SANS		
		Nb. plants (milliers)	T	g/plant	Nb. plants (milliers)	T	g/plant	Nb. plants (milliers)	T	g/plant	Nb. plants (milliers)	T	g/plant
2018	1	390	48,5	124	430	59,0	137	307	40,6	132	370	51,9	140
	2	360	47,6	132	380	51,0	134	300	40,5	135	350	48,1	137
	3	293	41,7	142	353	36,2	102	273	40,0	147	297	31,5	106
	Moyenne	348	45,91	132	388	48,70	124	293	40,36	138	339	43,84	128
	CV		8,07			23,75			0,84			27,70	
2019	1	336	37,9	113	355	42,2	119	230	28,0	122	279	34,4	123
	2	260	39,6	152	377	43,1	114	172	27,9	162	281	35,3	126
	3	227	33,6	148	306	41,2	135	120	17,5	146	180	28,1	156
	Moyenne	274	37,00	138	346	42,15	123	174	24,46	143	247	32,60	135
	CV		8,34			2,24			24,50			12,06	

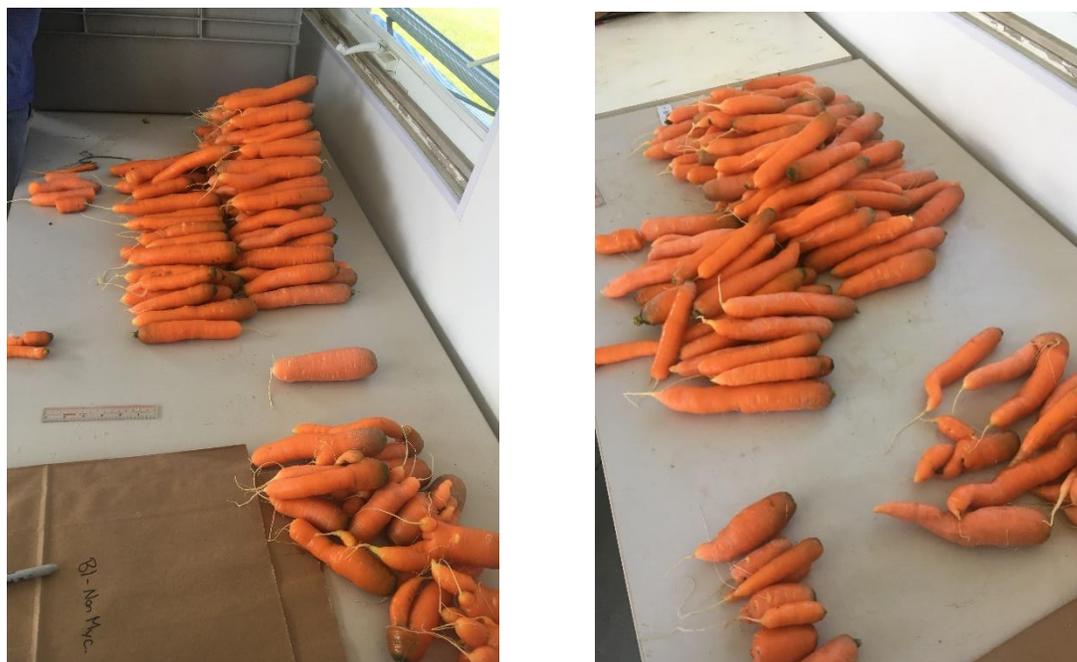


Figure 6 Exemple de lots de carottes récoltées en 2018 et classées vendables et non vendables selon le traitement (sans inoculant (gauche) et avec inoculant (droite)).

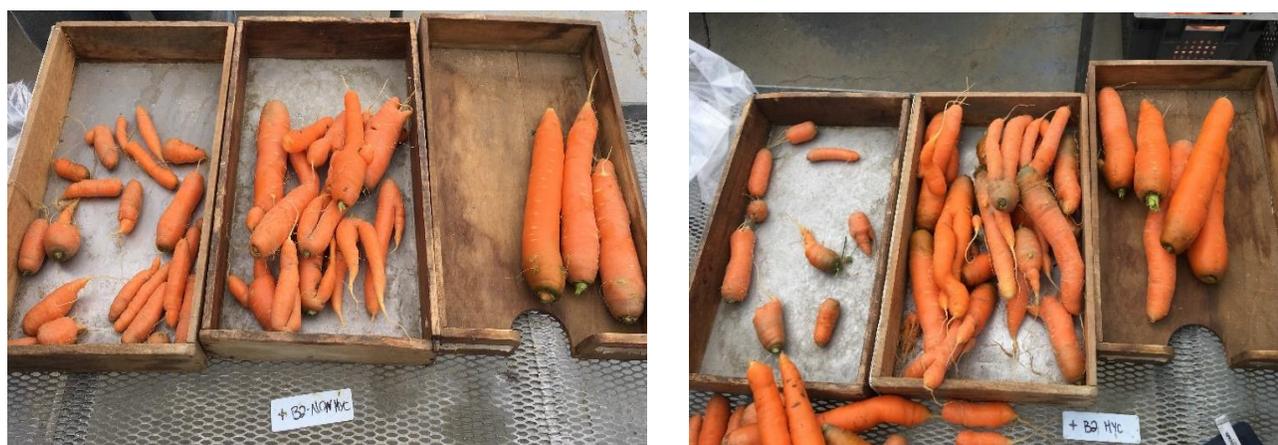


Figure 7 Exemple de lots de carottes déclassées en 2019 (trop petites, difformes ou trop grosses) selon le traitement (sans inoculant (gauche) et avec inoculant(droite)).

3.3 DÉTECTION DE MYCORHIZES SUR LES RACINES ET DANS LE SOL

L'absence de réponse aux traitements qui a été démontrée par les résultats des sections précédentes soulève des questions quant à l'efficacité de l'inoculation des semences avec la souche commerciale de mycorhizes. Pour répondre à cette question, deux analyses avaient été planifiées pour valider si l'inoculation des semences avait bel et bien été réussie. La première méthode, quantitative, est celle du décompte de la colonisation des champignons mycorhiziens sur les radicelles. Cette méthode ne permet pas de spécifier la souche du champignon présent mais permet quand même de décrire si une plus ou moins grande colonisation des radicelles par les champignons mycorhiziens a été atteinte. Le tableau 7 présente les résultats obtenus avec cette technique à chaque année. Tel qu'attendu, à chaque année, une proportion beaucoup plus importante de radicelles a été détectée avec présence de champignons, lorsque les semences avaient été inoculées avec le produit Agtiv. Cette différence était en moyenne 92 % supérieure en 2018 et 21 % supérieure en 2019 (Tableau 7). Ces différences importantes peuvent certainement s'expliquer par l'apport du mycorhize commerciale, même s'il n'est pas possible de spécifier s'il s'agit bien de ce champignon.

Tableau 7 colonisation mycorhizienne des racines des carottes vendables à la récolte selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, à la fin des saisons 2018 et 2019.

	REP	% de colonisation racinaire	
		INOCULÉE	SANS
2018	1	43,0	25,5
	2	51,5	20,5
	3	56,5	32,5
	moyenne	50,33	26,17
	CV	13,56	23,04
2019	1	38,5	28,0
	2	35,0	34,5
	3	47,5	36,5
	moyenne	40,33	33,00
	CV	15,99	13,47

Afin de s'assurer que les résultats ci-dessus ne relèvent pas du hasard, puisqu'en effet toute une flore microbienne indigène est déjà présente dans le sol et constituée de champignons qui sont capables de créer des symbioses mycorhizienne, une détection génétique (métagénomique) de l'espèce présente sur les radicelles et sur le sol adhérent à celles-ci a aussi été réalisée. Les résultats détaillés de cette détection sont présentés au Tableau 8. Puisque la souche spécifique du fabricant ne peut être isolée avec la base de données utilisée au LEM, la détection a été réalisée au niveau de l'espèce de champignon, soit *Rhizophagus irregularis*. Ceci n'exclut donc pas que cette espèce, mais d'une souche différente, se retrouvait déjà dans le sol à l'étude et qu'elle a aussi colonisée les carottes. Toutefois, comme les résultats révèlent une tendance pour l'observation plus

fréquente de cette espèce dans les traitements avec inoculum vs. sans et ce, surtout dans les racines contrairement au sol adhérent, il est possible de déduire qu'une proportion de cette observation est due à l'inoculum commercial (Tableau 8). Un second aspect de l'évaluation génétique est qu'elle met en lumière l'occurrence importante d'espèces de champignons capables de symbioses mycorhiziennes de la famille des Glomeraceae dans le sol des traitements avec des semences n'ayant pas reçu l'inoculum commercial et que ces espèces ont donc pu également faire compétition à la souche commerciale pour entrer en symbiose avec les racines de carottes ou tout simplement avoir le même effet que la souche commerciale dans le traitement sans inoculum. En 2019 par exemple, au niveau du sol adhérent, des proportions plus importantes de Glomeraceae ont été détectées dans le sol adhérent aux racines de carottes du traitement n'ayant pas reçu d'inoculum traitements. Ceci démontre que naturellement la microflore du sol de l'essai avait la possibilité de créer des symbioses mycorhiziennes et donc que l'ajout d'un inoculum commercial n'était alors pas nécessairement justifiable dans ces conditions. En effet les ajouts de l'inoculum commercial n'ont eu aucun effet sur les rendements et la croissance des carottes dans cet essai, deux années de suite.

Tableau 8 Identification génétique de la richesse en Glomeraceae (nb d'observation (Obs) et proportion (%)) au niveau des radicelles de carottes et du sol adhérent selon présence ou absence d'inoculum mycorhizien commercial sur les semences, à la fin des saisons 2018 et 2019.

Année	Type d'échantillon	Traitement	REP	Richesse Glomeraceae (Obs)	Glomeraceae (%)	Richesse Rhizophagus (Obs)	Rhizophagus irregularis* (%)
2018	RADICELLES	Inoculé	B1	11	29,16	5	12,95
			B2	16	21,40	7	5,32
			B3	11	7,10	4	1,88
		SANS	B1	11	11,08	3	4,17
			B2	16	34,81	4	2,55
			B3	13	25,26	6	3,37
	SOL ADHÉRANT	Inoculé	B1	10	7,99	3	2,09
			B2	4	1,02	2	0,73
			B3	10	5,51	2	0,80
		SANS	B1	5	1,28	2	0,19
			B2	9	4,33	0	0,00
			B3	10	8,27	5	0,57
2019	RADICELLES	Inoculé	B1	3	4,26	1	3,72
			B2	8	19,49	2	11,16
			B3	9	14,46	2	2,26
		SANS	B1	6	7,89	2	0,44
			B2	16	12,34	4	0,12
			B3	9	18,13	3	6,97
	SOL ADHÉRANT	Inoculé	B1	9	3,11	3	0,94
			B2	6	16,08	2	0,90
			B3	7	3,25	3	0,37
		SANS	B1	3	3,60	2	2,51
			B2	13	20,49	2	1,89
			B3	10	27,66	2	1,90

*Rhizophagus irregularis (syn.: Glomus intraradices; Glomus irrugulare)

CONCLUSION

Cet essai a permis de démontrer, deux années de suite, qu'il n'y a pas eu d'avantage sur la production des rendements en carottes nantaises à inoculer les semences avec le mycorhize commercial. Au niveau économique, il n'y a donc pas de justification à opter pour l'ajout de l'inoculum mycorhizien en sol loameux argileux en contexte de transition biologique avec la carotte nantaise, cv. Presto. Des facteurs de site, tel que la fertilité naturelle du sol, surtout en N, sa texture et sa localisation géographique (zone géographique déjà hôte de souches indigènes de l'espèce commerciale) peuvent toutes avoir contribué à l'absence de réponse dans ce contexte spécifique. Des biais au niveau de la densité de semis qui aurait pu être inférieure dans les traitements avec inoculum, à cause de l'accumulation de poudre dans l'engrenage du semoir, pourrait aussi avoir contribué à la moins bonne performance de ce traitement (moins de plants/ha et calibre plus gros (non vendable)). Des essais avec davantage de répétitions (plus que 3) auraient également pu faire ressortir les possibles intérêts des mycorhizes en éliminant des facteurs de variabilité de sites et d'années. Cette étude a néanmoins confirmé que la symbiose était effective entre l'inoculum commerciale et les carottes alors que les taux de colonisation et l'occurrence de l'espèce commerciale étaient davantage observés sur les racines ayant reçu l'inoculum au semis, même si aucun effet sur la croissance ou les rendements en a découlé. Des conditions moins optimales de croissances auraient peut-être fait ressortir l'intérêt de cette symbiose. De plus, il serait intéressant de mieux comprendre la compétition probable entre des souches indigènes et commerciales sur les rendements.

RÉFÉRENCES

Bolyen, E., Rideout, J. R., Dillon, M. R., Bokulich, N. A., Abnet, C., Al-Ghalith, G. A., ... & Bai, Y. (2018). QIIME 2: Reproducible, interactive, scalable, and extensible microbiome data science (No. e27295v2). PeerJ Preprints.

CARTV. 2019. Portail bio québec. 2019. <https://www.portailbioquebec.info/>

Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). Québec. Agdex 533, méthode SS-1.

CRAAQ 2010. Guide de référence en fertilisation du Québec. 2e édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Ste-Foy, Québec. 473p.

Fortin, J.A., Plenchette, C. et Piché, Y. Les Mycorhizes : l'essor de la nouvelle révolution verte. Éditions Multimondes. Montréal. 163 p.

Isaac, A.R. et Johnson, W.C. 1976. Determination of nitrogen in plants tissue using a block digester. J. AOAC 59 :98-100.

Lumini, E. et coll., 2010. Disclosing arbuscular mycorrhizal fungal biodiversity in soil through a land-use gradient using a pyrosequencing approach. *Environmental Microbiology*, 12(8), pp.2165–2179.

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

Robitaille, J. et Oulatoude, J. 2019. Les produits biologiques au Québec : ventes dans les grands magasins et comparaison avec le Canada. MAPAQ, BioClips+, Volume 20 (1). 14 pages.

Sissingh, H.A. 1971. Analytical technique of the PW method used for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands. *Plant and Soil* 34:483-486.

Statistique Canada. 2016. <http://www.statcan.gc.ca/pub/95-640-x/2016001/article/14816-fra.htm>

Tran, T.S., M. Giroux, et A. N'Dayegamiye. 1992. Utilisation rationnelle des fumures azotées minérales : aspects agronomiques et environnementaux. *Agrosol* 5 (2):18-25.

Vierheilig, H. Andrew P. Coughlan, A.P., Wyss, U. et Piché, Y. 1998. Ink and Vinegar, a Simple Staining Technique for Arbuscular-Mycorrhizal Fungi. *Applied and environmental microbiology*. p. 5004–5007.

ANNEXE

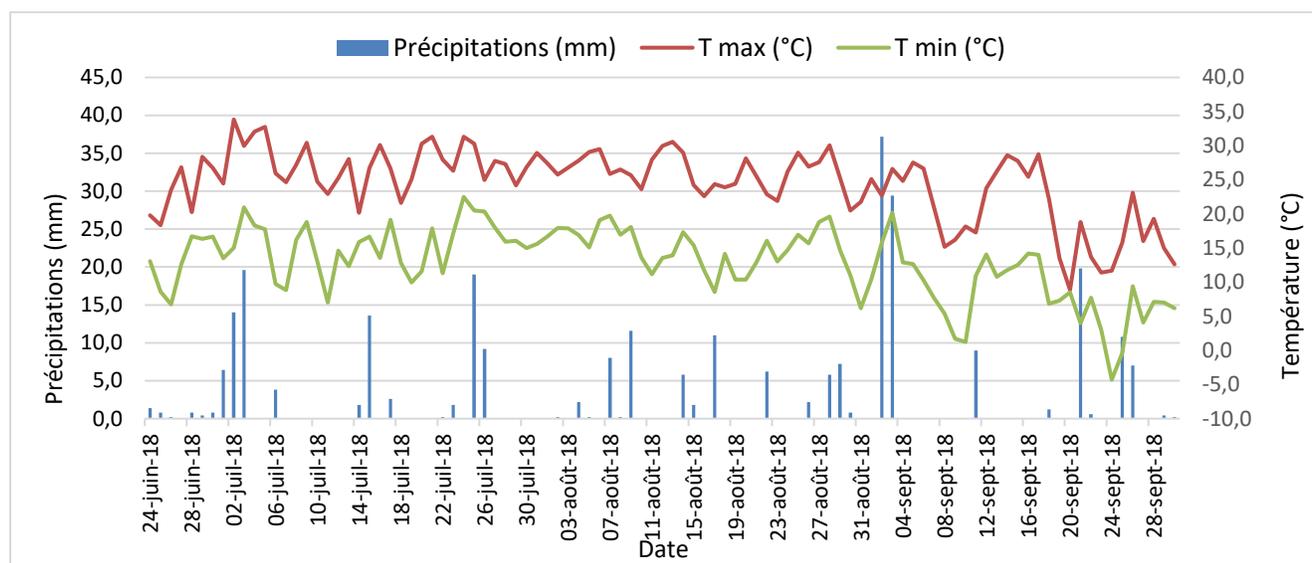


Figure 8 Conditions météorologiques journalières au site d'étude. Les précipitations sont issues du pluviomètre en place au site et les températures maximales et minimales sont issues de la station météorologique St-Bernard (Chaudière-Appalaches), à proximité du site, saison 2018.

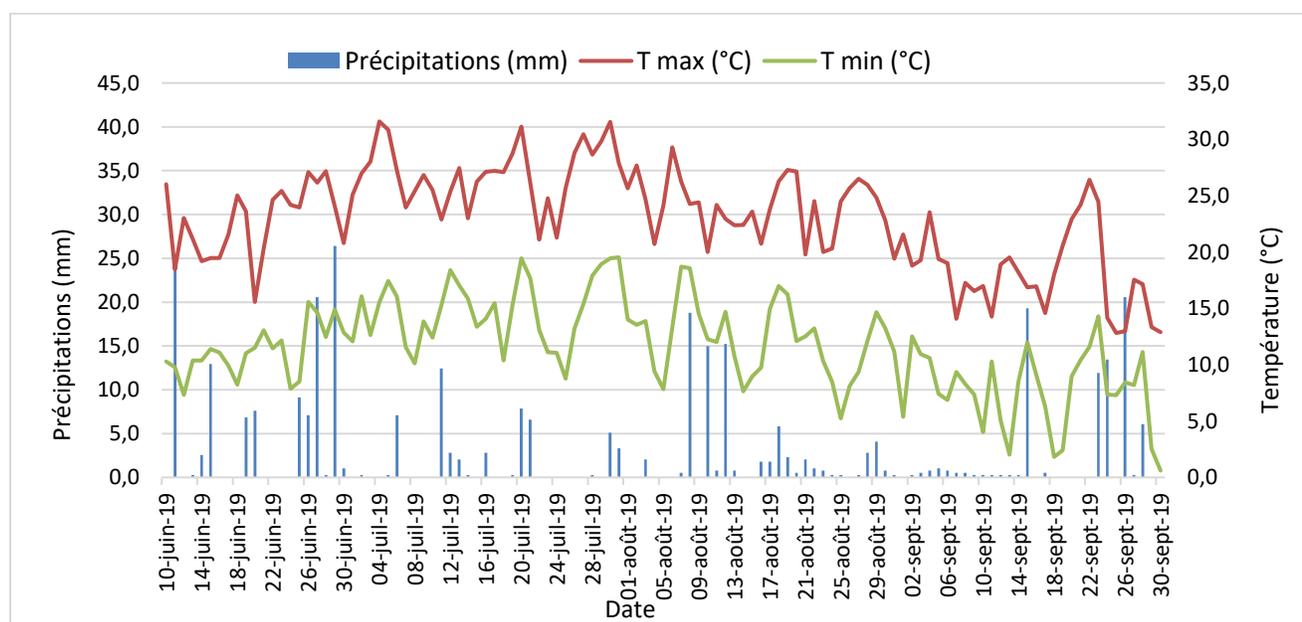


Figure 9 Conditions météorologiques journalières au site d'étude. Les précipitations sont issues du pluviomètre en place au site et les températures maximales et minimales sont issues de la station météorologique St-Bernard (Chaudière-Appalaches), à proximité du site, saison 2019.