

Programme d'appui pour un secteur agroalimentaire innovateur

Essais sur l'apport de différents types de matières organiques appliquées en bande à l'implantation d'un verger de cassis.

Rapport final

n° 11-321

Avril 2011 – mars 2013



Christine Landry, chercheure, agr., Ph.D. – IRDA
Carl Boivin, chercheur, agr., M.Sc. – IRDA
Luc Belzile, chercheur, agr., agroéconomiste, M.Sc. – IRDA
Julie Mainguy, attachée de recherche, agr., B.Sc. A. – IRDA

Avec la collaboration de
Daniel Bergeron, agr., M.Sc. – MAPAQ
Danièle Pagé, t.a – IRDA
Stéphane Nadon, t.a. – IRDA

Ce projet a été réalisé grâce à une aide financière du Programme d'appui à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre *Cultivons l'avenir* conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Rédaction

Christine Landry
Carl Boivin
Luc Belzile
Julie Mainguy

Chercheure, biologiste, agronome, IRDA
Chercheur, agronome, IRDA
Chercheur, économiste, IRDA
Attachée de recherche, agronome, IRDA

Responsables scientifiques

Christine Landry
Carl Boivin

Entreprise requérante

Catherine Monna

Vice-présidente, Cassis Monna & Filles, Île d'Orléans

Collaborateurs

Danièle Pagé
Daniel Bergeron
Stéphane Nadon
Michèle Grenier
Laurence-Simard-Dupuis
Paul Deschenes
Michaël Lemay
David Bilodeau
Nicolas Watters
Simon Gagnon

Technicienne agricole, IRDA
Conseiller horticole, agronome, MAPAQ (DRCN)
Technicien agricole, IRDA
Statisticienne, IRDA
Attachée de recherche, agronome, IRDA
Professionnel de recherche, IRDA
Technicien agricole, IRDA
Étudiant d'été en génie agroenvironnemental
Étudiant d'été en agronomie
Étudiant d'été

Table des matières

1	DESCRIPTION DU PROJET	8
1.1	Introduction	8
1.2	Objectif général.....	9
1.3	Objectifs spécifiques	9
2	MATÉRIEL ET MÉTHODE	10
2.1	Site expérimental	10
2.2	Mise en place de l'essai et régie de culture	11
2.3	Traitements comparés	13
2.4	Dispositif expérimental et analyses statistiques	14
2.5	Collecte des données.....	16
2.5.1	Analyses physiques, chimiques et biologiques du sol	16
2.5.2	Développement et nutrition des plants	17
2.5.3	Conditions météorologiques	18
2.5.4	Suivi des conditions hydriques du sol	20
3	RÉSULTATS ET ANALYSE	21
3.1	Propriétés au site expérimental	21
3.2	Propriétés des amendements.....	21
3.3	Nutrition et développement des plants.....	21
3.3.1	Hauteur et croissance des plants.....	21
3.3.2	Nutrition des plants	24
3.4	Évolution des éléments fertilisants et de l'activité biologique du sol	26
3.4.1	pH du sol.....	26
3.4.2	Rapport C/N, C et N totaux en (%).....	27
3.4.3	Activité biologique des sols et fourniture en azote.....	28
3.4.4	Évolution du P, K, Ca et Mg Mehlich-3 et SSE.....	31
3.4.5	Nitrates résiduels	38
3.5	Évolution des propriétés physiques du sol	38
3.6	Aspects économiques	44
4	CONCLUSION	48
5	REMERCIEMENTS.....	49
6	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	50

Liste des figures

Figure 1. Application des amendements dans les sillons ouverts mécaniquement, octobre 2011.	11
Figure 2. Transplantation des cassis au site expérimental, octobre 2010.....	12
Figure 3. Dispositif expérimental au champ.....	15
Figure 4. Prélèvement foliaire pour l'évaluation du statut nutritionnel des plants.....	17
Figure 5. Mesure de hauteur de plants au site expérimental, juillet 2012.	18
Figure 6. Pluviométrie (mm) au site expérimental du 26 mai au 11 octobre 2011.....	19
Figure 7. Pluviométrie (mm) au site expérimental du 17 mai au 22 octobre 2012.....	19
Figure 8. Exemple de positionnement des tensiomètres au site expérimental, juillet 2011.	20
Figure 9. Hauteurs moyennes des plants selon l'apport d'AO ou d'engrais minéraux, été 2011. 22	
Figure 10. Hauteurs moyennes des plants selon l'apport d'AO ou d'engrais minéraux, été 2012.	23
Figure 11. Croissance nette des plants sur la saison en 2011 et 2012 selon l'apport d'AO ou d'engrais minéraux.....	23
Figure 12. Évolution du pH du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.	27
Figure 13. Évolution du C/N du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.	28
Figure 14. Mesure de l'activité biologique des sols selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.	29
Figure 15. Potentiel de relâchement du N_{Min} selon l'apport d'AO et d'engrais minéral au terme de l'essai.	30
Figure 16. Concentrations en N_{Min} dans la solution du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.....	31
Figure 17. Évolution des teneurs en P_{M3} du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.....	32
Figure 18. Teneurs en P_{SSE} du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.	33
Figure 19. Évolution des teneurs en K_{M3} du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.....	34
Figure 20. Évolution du Ca_{M3} du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.	35
Figure 21. Évolution du Mg_{M3} du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.	36
Figure 22. Charges du sol en Ca extrait selon la méthode SSE selon l'apport d'AO et d'engrais minéral en juillet 2012.	37
Figure 23. Charges du sol en Mg extrait selon la méthode SSE selon l'apport d'AO et d'engrais minéral en juillet 2012.	37
Figure 24. N_{Min} résiduel selon l'apport d'AO ou des engrais minéraux au terme de l'essai.	38
Figure 25. Courbes de désorption en eau du sol à l'automne 2012 selon l'apport ou non d'AO à l'implantation d'automne 2010 (0 à 100 kPa).	39
Figure 26. Corrélation entre le taux de matière organique du sol de chacune des 15 parcelles et la teneur en eau volumique du sol à la saturation.	40
Figure 27. Corrélation entre la proportion de gravimétrie du sol mesurée dans les 15 parcelles et la teneur en eau volumique du sol à 5 kPa.	42

Figure 28. Corrélation entre la proportion de gravimétrie du sol mesurée dans les 15 parcelles et la tension de l'eau dans le sol mesurée à la CC (Période 4, 4 juin).	43
Figure 29. Coûts des amendements et fertilisants dans la culture du cassissier, incluant les frais d'opérations culturales (\$ ha ⁻¹).	45
Figure 30. Coûts des amendements et fertilisants dans la culture du cassissier, incluant les frais d'opérations culturales (\$ ha ⁻¹ cm ⁻¹ de croissance nette).....	45
Figure 31. Ratio des valeurs des éléments fertilisants/Coûts d'amendement et des fertilisants.	47

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques du sol d'origine, zone non-amendée, printemps 2011 (0-30 cm). ...	10
Tableau 2. Résumé des opérations culturales	12
Tableau 3. Caractéristiques des AO sur base fraîche, tels qu'épandus au champ en octobre 2010.	13
Tableau 4. Apports totaux en N, P ₂ O ₅ , K ₂ O, Ca et Mg pour les traitements à l'étude lors de l'implantation	14
Tableau 5. Conditions météorologiques au site expérimental	18
Tableau 6. Teneurs foliaires en N _{tot} des plants de cassis selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, en 2011 et 2012.....	25
Tableau 7. Teneurs foliaires en P, K, Ca et Mg des plants de cassis selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, en 2011 et 2012.	25
Tableau 8. Fourchettes des teneurs en éléments nutritifs des feuilles adaptées pour le cassis. .	26
Tableau 9. Taux de matière organique moyen mesuré dans les parcelles selon le traitement....	40
Tableau 10. Coefficients de régression (R ²) résultant de la relation entre le taux de MO et la valeur de teneur en eau pour une tension donnée (kPa) pour une parcelle donnée.	41
Tableau 11. Densité apparente moyenne du sol (g cm ⁻³) selon le traitement.	41
Tableau 12. Valeurs moyennes de tension de l'eau dans le sol mesurées selon le traitement pour certaines périodes durant la saison 2012.	41
Tableau 13. Coefficients de régression (R ²) résultant de la relation entre la gravimétrie du sol et la valeur de teneur en eau du sol pour une tension donnée (kPa) pour une parcelle donnée.	42
Tableau 14. Coefficients de régression (R ²) résultant de la relation entre la gravimétrie du sol et la tension de l'eau dans le sol pour une période donnée et pour une parcelle donnée.	43
Tableau 15. Coûts des amendements et des fertilisants dans la culture du cassissier, incluant les des opérations culturales.	44
Tableau 16. Valeur d'enrichissement en P et K selon les traitements.	46
Tableau 17. Valeur d'enrichissement fertilisante / coût de la fertilisation.	46

1 DESCRIPTION DU PROJET

1.1 Introduction

Le cassissier est un arbuste qui s'adapte à une grande variété de sol mais qui affectionne particulièrement les sols bien drainés et adéquatement pourvus en matière organique (MO) (Filière des plantes médicinales biologiques du Québec [FPMBQ], 2009). Son implantation est une étape déterminante puisqu'il s'agit d'une production pérenne et que, par conséquent, on ne peut retravailler le sol sur le rang une fois la culture établie. Le sol doit ainsi être en mesure de soutenir une productivité à long terme en fournissant un milieu nutritif et une structure assurant une bonne circulation de l'air et de l'eau. Il est généralement recommandé d'incorporer au sol à l'automne, avant plantation, 45 T ha^{-1} (Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario [MAAARO], 2013) de fumier ou compost puisque la MO est une composante importante du maintien de la qualité des sols. Toutefois, les ouvrages de référence disponibles aux producteurs et aux conseillers leur permettant de planifier adéquatement l'implantation du cassissier ont en majorité plus de 10 ans. Les recommandations sur les apports d'amendements organiques (AO) ne sont donc pas adaptées aux nouvelles exigences réglementaires en matière de charge maximales fertilisantes. En effet, l'apport d'AO est encore le plus souvent considéré comme un simple ajout de MO au sol, sans considérer son potentiel fertilisant. De plus, dans ces ouvrages, l'épandage sur toute la superficie du champ est encore suggéré. Ceci ne tient pas compte des bénéfices potentiels de l'application en bande qui devraient être importants pour cette culture puisque le cassissier est planté en rangs très distancés (2,4 à 3,5 m) et que son système racinaire s'étend rarement au-delà de la largeur de ses structures aériennes (FPMBQ, 2009). La portion d'AO se trouvant entre les rangs reste ainsi inutilisée et sa charge nutritive demeure inexploitée par la culture, allant à l'encontre du courant actuel de valorisation et de maximisation du cycle de vie des nutriments. Il est toutefois de plus en plus pertinent de tirer le meilleur profit du potentiel fertilisant et amendant des AO puisque plusieurs producteurs ne produisent plus de fumiers ou composts sur leur ferme et doivent par conséquent en importer ou se tourner vers d'autres sources d'AO plus dispendieuses, engendrant des coûts importants.

C'est dans ce contexte que l'entreprise Cassis Monna & Filles, située à l'Île d'Orléans, a entrepris, de concert avec l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), direction régionale Capitale-Nationale (DRCN), de tester l'utilité d'apports en bande de divers AO à l'implantation du cassissier afin de soutenir une productivité optimale sur le long terme. L'entreprise avait en effet remarqué que les cassissiers implantés récemment, sans apport de MO et sur des terres n'ayant pas d'historique d'épandage, présentaient une productivité inférieure aux plants vieillissants des premiers secteurs qui recevaient des engrais de ferme avant la transition de la production vers le cassis. Un projet a donc été élaboré pour étudier les bénéfices potentiels sur la nutrition minérale et hydrique, ainsi que sur le développement des plants, de l'application en bande à l'implantation de divers AO provenant des secteurs agricoles et municipaux (compost de fumier, compost de résidus verts, fibres neuves de noix de coco et mousse de tourbe). Les connaissances acquises lors de cette étude seront de plus transférables aux autres cultures pérennes (ex. framboise, camerise, amélanchier, etc.), permettant à ce secteur de production de bénéficier des gains économiques, environnementaux et économiques générés par ce projet.

1.2 Objectif général

Ce projet consiste à tester l'utilité d'apports en bande de divers amendements organiques (AO) à l'implantation du cassissier afin de soutenir une productivité optimale sur le long terme.

1.3 Objectifs spécifiques

- Vérifier l'impact d'apports de divers AO lors des premières années de croissance sur :
 - Le développement des plants
 - L'évolution des propriétés nutritives du sol (disponibilité des éléments)
 - L'évolution des propriétés physiques du sol (disponibilité de l'eau, aération du sol)
- Effectuer un calcul économique comparatif des coûts

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Site expérimental

Le projet s'est déroulé en conditions culturales commerciales à l'entreprise Cassis Mona & filles située à l'île d'Orléans, Québec (46°52'N, 71°05'O) de l'automne 2010 à l'automne 2012. Le sol du site, dont les caractéristiques sont rapportées au Tableau 1, était un loam sablo-argileux relativement pauvre en matière organique (MO). Le sol présentait toutefois une saturation en phosphore (P) près du seuil maximal recommandé pour les apports de P, ainsi qu'une richesse en potassium (K). Le site comportait une légère pente de 1,5° orientée vers le nord-ouest. Une plantation de cassissiers de trois ans, une haie boisée et la route constituaient l'environnement immédiat de la nouvelle plantation.

Tableau 1. Caractéristiques du sol d'origine, zone non-amendée, printemps 2011 (0-30 cm).

Paramètres	Valeurs
pH _{eau}	5,9
Matière organique 0-15cm (%)	2,0
Matière organique 0-30cm (%)	2,7
C _{tot} (%)	1,7
N _{tot} (%)	0,12
C/N	13,5
Sable (%)	57
Limon (%)	21
Argile (%)	22
Densité apparente (g cm ₃ ⁻¹)*	1,4 – 1,6
Éléments majeurs Mehlich-3	
P (kg ha ⁻¹ b.s.)	225
K (kg ha ⁻¹ b.s.)	451
Ca (kg ha ⁻¹ b.s.)	3874
Mg (kg ha ⁻¹ b.s.)	255
Al (mg kg ⁻¹ b.s.)	1099
P _{M3} /Al _{M3} (%)	8,8
Éléments mineurs Mehlich-3 (mg kg ⁻¹ b.s.)	
B	0,2
Cu	1,6
Fe	216,7
Mn	14,4
Zn	3,1
Na	10,0

* Analysé dans la strate 0-15cm

2.2 Mise en place de l'essai et régie de culture

Dans un premier temps, en octobre 2010, des sillons de 8 pouces (0,20 m) de profondeur par 1 m de large ont été ouverts mécaniquement (Figure 1) à 3,35 m de distance les uns des autres. Dans les parcelles recevant les AO, un volume de 0,2 m³ d'AO (4 par 8 pouces) a alors été épandu dans chacun des sillons, puis recouvert d'une mince couche de terre. Par la suite, un apport de chaux a été effectué au moyen de machinerie spécialisée, suivi de l'application à la main des engrais minéraux complémentaires. Les AO, les engrais et la chaux ont ensuite été incorporés au moyen d'un rotoculteur, ce qui a permis de niveler le sol pour permettre la pose du système d'irrigation goutte-à-goutte et du paillis de polyéthylène noir.



Figure 1. Application des amendements dans les sillons ouverts mécaniquement, octobre 2011.

Dans un deuxième temps, 1 200 plants en mottes âgés de 1 an ont été transplantés à 0,5 m d'espacement sur le rang pour une densité théorique de 5 970 plants ha⁻¹ (Figure 2). Hormis les AO et la fertilisation minérale qui ont été apportés au sol lors de la préparation du terrain, la régie de culture (fertilisation, irrigation, traitements phytosanitaires) des années subséquentes était sous la responsabilité du producteur. Enfin, lors de la seconde année de croissance, soit au printemps 2012, les plants ont été taillés en biseau en laissant un minimum de trois bourgeons par plant. Les diverses opérations culturales sont résumées au Tableau 2.



Figure 2. Transplantation des cassis au site expérimental, octobre 2010.

Tableau 2. Résumé des opérations culturales.

Date	Opérations culturales
2010	
Octobre	Ouverture du sillon Application des amendements et engrais minéraux Application de la chaux Passage du rotoculteur Installation du paillis de polyéthylène et du système d'irrigation Plantation
2011	
Avril	Caractérisation physico-chimique du sol d'origine (zone non-amendée)
Mai - octobre	Suivi de la culture et collecte des données
2012	
Mai	Taille des cassissiers
Mai - septembre	Suivi de la culture et collecte des données
Octobre	Prélèvement de sol pour l'évaluation des propriétés physiques du sol

2.3 Traitements comparés

La présente étude évaluait quatre traitements d'AO de nature distincte, comparés à un témoin sans apport de matière organique, ne recevant que de l'engrais minéral.

- Compost de résidus verts (Les Composts du Québec #212002): CVERT
- Compost de fumier (Les Composts du Québec #201002) : CFUM
- Mousse de tourbe (Les Tourbières Berger Ltée. produit BP-P) : MTOURBE
- Fibres neuves de noix de coco (Groupe Horticole Ledoux): FCOCO
- Témoin sans apport d'AO : TÉMOIN

Chacun des AO a d'abord été caractérisé (Tableau 3) afin de mieux connaître sa composition en éléments nutritifs majeurs. Cette information a été utilisée pour balancer les apports en éléments nutritifs de chacun des traitements afin de s'assurer que les différences observées au cours de l'étude soient effectivement dues à la présence et au type d'AO, et non simplement à une fertilisation accrue pour certains traitements. Suivant leur analyse, leurs contenus en N, P et K ont donc été balancés par un apport complémentaire en éléments minéraux en utilisant soit le nitrate d'ammonium calcique (27-0-0), le super phosphate triple (0-46-0) ou le chlorure de potassium (0-0-60). De même, les contenus en N, P et K du témoin minéral ont été ajustés pour atteindre les mêmes doses d'éléments disponibles que celles fournies par les AO balancés. Selon le volume d'application d'AO suggéré par le producteur de l'entreprise, on peut donc constater au Tableau 4 que les plants ont reçu à l'implantation un apport d'environ 55, 157 et 106 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ et K₂O disponibles. Seuls les traitements CVERT et CFUM sont légèrement différents puisque les calculs ont été d'abord basés sur la caractérisation du fabriquant. Les données présentées dans le rapport sont toutefois celles obtenues suite aux analyses de laboratoire. Quoiqu'il en soit, ces valeurs demeurent tout de même très similaires et rencontrent les besoins du cassissier, considérant les apports ultérieurs en saison par fertigation prévus par le producteur. À ce titre, notons toutefois qu'au cours de la saison 2011, le producteur n'a apporté aucune fertilisation supplémentaire. En 2012, la fertilisation recommandée en N et K₂O a été apportée à la culture en saison.

Tableau 3. Caractéristiques des AO sur base fraîche, tels qu'épandus au champ en octobre 2010.

Paramètres	Amendements			
	CVERT	CFUM	MTOURBE	FCOCO
pH _{eau}	7,2	6,4	-	5,7
matière sèche (%)	52,0	49,1	65,0	-
matière organique (kg T ⁻¹)	220	239	464	753
N total (kg T ⁻¹)	5,3	4,8	6,2	5,1
N-NH ₄ (kg T ⁻¹)	0,3*	0,5*	ND	ND
P (kg T ⁻¹)	0,92	2,60	0,15	0,28
K (kg T ⁻¹)	3,7	3,1	0,31	4,8
Ca (kg T ⁻¹)	15,3	14,6	0,91	2,8
Mg (kg T ⁻¹)	1,60	1,9	0,56	1,3
Rapport C/N	24,1	28,9	43,4	85,7

* Donnée provenant de l'analyse du fabriquant.

Tableau 4. Apports totaux en N, P₂O₅, K₂O, Ca et Mg pour les traitements à l'étude lors de l'implantation

Paramètres	Traitements				
	CVERT	CFUM	MTOURBE	FCOCO	TÉMOIN NPK
Quantité appliquée (T ha ⁻¹)	33,4	32,7	9,3	9,1	-
Coefficient efficacité N	0,3	0,25	0,1	0,1	-
N AO efficace (kg ha ⁻¹)	63,1	55,6	5,8	4,6	-
N minéral apporté (kg ha ⁻¹)	0	1,8	49,3	50,4	55,0
Apport N efficace total	63,0	57,0	55,0	55,0	55,0
Coefficient efficacité P	0,7	0,7	0,2	0,2	-
P ₂ O ₅ AO efficace (kg ha ⁻¹)	49,3	136,3	0,6	1,2	-
P ₂ O ₅ minéral apporté (kg ha ⁻¹)	71,9	0,0	156,3	155,7	157,0
Apport P ₂ O ₅ efficace total	121,0	136,0	157,0	157,0	157,0
Coefficient efficacité K	0,9	0,9	0,2	0,2	-
K ₂ O AO efficace (kg ha ⁻¹)	133,5	109,5	0,7	10,5	-
K ₂ O minéral apporté (kg ha ⁻¹)	24,8	0,0	105,2	95,3	106,0
Apport K ₂ O efficace total	158,0	110,0	106,0	106,0	106,0
Ca total (kg ha ⁻¹)	511	477	17,6	34,3	10,2
Mg total (kg ha ⁻¹)	53	62	9,8	16,7	5,1

2.4 Dispositif expérimental et analyses statistiques

Le dispositif expérimental était un plan en blocs aléatoires complets, comprenant 3 répétitions de chacun des 5 traitements, pour un total de 15 parcelles (

Figure 3). Chacune des parcelles avait 10 mètres de longueur et incluait 4 rangs, pour une surface totale de 135 m². Chacune des parcelles était équipée d'un tensiomètre. L'ensemble des échantillonnages et des mesures a été pris dans les deux rangs centraux. La procédure MIXED de SAS (Littell et coll., 2006) a été utilisée pour le traitement des variables, lesquelles ont été analysées séparément pour les années 2011 et 2012. Un modèle mixte normal a été ajusté pour chaque variable de réponse. Pour la plupart des variables, des mesures répétées étaient prises à différentes dates pendant la saison. Les effets fixes du modèle étaient donc les traitements, les dates de mesure et l'interaction Date x Traitement. Pour l'analyse de la hauteur et de la croissance des plants, la hauteur initiale des plants lors de l'implantation a été utilisée comme co-variable dans ce modèle. Les hypothèses d'homogénéité des variances et de normalité de la distribution des erreurs ont été vérifiées au moyen de graphiques de résidus. Quelques rares données extrêmes ont été identifiées et retirées du jeu de données. La présence ou l'absence de différence statistique est rapportée par la valeur de probabilité « *P* » (*p-value*). Un « *P* » suivi du symbole « < » (inférieur à) 0,05 indique que l'on peut s'attendre à ce que le résultat soit attribuable au hasard moins de 5 fois sur 100 ou autrement dit, qu'il y a 95 % des chances que cette affirmation soit exacte. Dans le cadre de cette étude, la valeur de « *P* » de l'effet des traitements est exprimée par l'indication « Trait à *P* = », celle pour l'effet du temps par « Date à *P* = ». Quand la probabilité s'applique à la comparaison des moyennes des différents traitements entre eux, la mention « *P* = » seul se retrouve entre parenthèses.

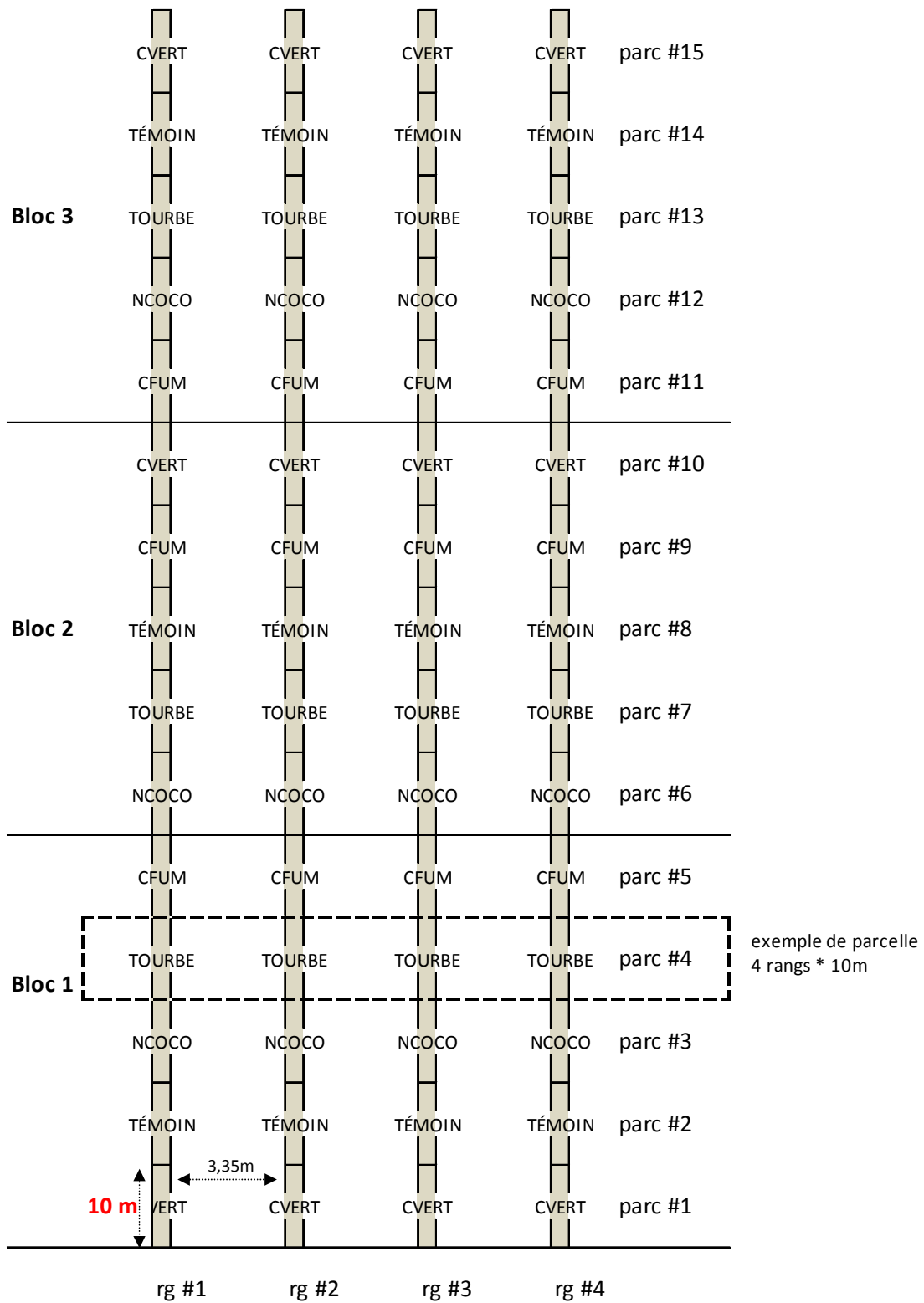


Figure 3. Dispositif expérimental au champ.

2.5 Collecte des données

2.5.1 Analyses physiques, chimiques et biologiques du sol

Au printemps 2011, une caractérisation par bloc a été effectuée afin de déterminer les propriétés physico-chimiques du sol d'origine. Pour cette opération, étant donné que les parcelles avaient déjà été mises en place à l'automne précédent, le sol a été prélevé en bordure de chacun des blocs du dispositif, dans une zone non compactée et non amendée. Par la suite, les échantillonnages ont été effectués dans chacune des 15 parcelles. Chacun des échantillons était un composite de 6 sous-échantillons prélevés sur le rang entre 2 plants au travers du paillis de polyéthylène dans la strate 0-30 cm à l'aide d'une sonde à tube creux. Les perforations créées par l'insertion de la sonde étaient systématiquement réparées avec du ruban (*Tuck Tape*). Les échantillons étaient conservés dans une glacière jusqu'à leur arrivée au laboratoire. Les sols étaient ensuite tamisés à 2 mm, puis séchés à l'air à 21 °C. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivis d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des Productions Végétales du Québec, 1988). Le C_{tot} et N_{tot} ont été déterminés au LECO. Le contenu en MO totale a été mesuré selon la méthode d'oxydation par voie humide de Walkley Black et/ou selon le contenu en C_{tot} LECO avec un facteur de 1,724, sauf dans le cas des analyses du volet physique de fin de saison où la MO a été déterminée par perte au feu. Les macro éléments ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) et dosés à l'ICP optique. Des échantillons de sol non perturbé ont également été prélevés dans chacun des blocs, dans la strate correspondant à la profondeur d'enracinement à ce moment (0-15 cm), afin d'établir en laboratoire la courbe de désorption en eau du sol initial (Topp et coll., 1993). La masse volumique apparente (MVA) du sol a aussi été mesurée en utilisant des cylindres de cuivre de volume connu, dont le contenu a été séché à 105 °C pendant 72 heures, puis pesé. En mai et octobre des deux années de l'étude, le N_{tot} et le P, K, Ca et Mg Mehlich-3 (M3), le carbone (C) et le pH des sols traités ont été dosés selon les méthodes décrites ci-haut. En juillet, le N minéral (N_{Min}), P, K, Ca et Mg disponibles ont été dosés suivant une extraction de la solution du sol par la méthode de saturation du sol à l'eau (SSE) (CPVQ, 1988). L'extraction SSE a été utilisée afin de s'approcher des méthodes utilisées en production commerciale. Pour se faire, le sol humide, préalablement tamisé frais à 4 mm, a été mélangé avec une quantité suffisante d'eau déminéralisée pour le porter à saturation. Après brassage, le sol a été laissé à reposer pendant 1 heure. Le surnageant a été filtré sur un Buchner à vide et les éléments du filtrat, considéré comme un extrait aqueux, ont été déterminés par colorimétrie au Technicon AA-II. Toujours en juillet, où se produit habituellement le pic de minéralisation des sols, le taux global d'activité biologique du sol a été estimé par dégagement de CO_2 . Le sol a été incubé en laboratoire à température contrôlée dans un contenant fermé et le CO_2 dégagé a été fixé par une solution de NaOH 1N puis mesuré par titrage au HCl 1N. L'activité de l'enzyme uréase a aussi été dosée par incubation de sol frais, à 37 °C pendant 2 heures. Le N-NH_4 libéré a été extrait avec une solution de KCl 1N et de HCl 0.01M, ce dernier agissant comme inhibiteur de l'enzyme (Kandeler et Gerber, 1988), puis dosé par colorimétrie au Technicon AA-II. Enfin, à l'automne 2012, en toute fin de projet, le taux de minéralisation du N organique a été déterminé dans chacune des parcelles par incubation de sol frais (10 jours). Enfin, dans le but de vérifier si les AO ont modifié les caractéristiques physiques des sols, des échantillons de sol non-perturbé ont été prélevés dans chacune des parcelles, entre deux plants sur le rang, dans la strate correspondant à la profondeur d'enracinement à ce moment (0-20 cm) afin d'établir les nouvelles courbes de désorption en eau, ainsi que les MVA finales.

2.5.2 Développement et nutrition des plants

Des échantillonnages foliaires ciblés permettant de suivre le statut nutritionnel des plants ont été faits à diverses reprises en cours de saison. Au printemps et à l'automne, seul le N_{tot} était mesuré, tandis qu'en juillet, l'analyse portait non seulement sur le N_{tot} , mais également sur les éléments majeurs P, K, Ca et Mg. Dans chacune des parcelles, 15 feuilles (plus jeune feuille mature complètement formée et déployée) (Figure 4) ont été prélevées et conservées dans une glacière à 4 °C jusqu'à leur réception au laboratoire. Préalablement à l'analyse, le matériel végétal a été séché à 65 °C et broyé à 100 mesh. Le N_{tot} , P_{tot} , K, Ca et Mg ont été extraits par digestion Kjeldahl (Isaac et Johnson, 1976). Le N a été dosé par colorimétrie automatisée sur autoanalyseur Technicon. Le contenu des autres éléments a été déterminé par spectrométrie d'émission au plasma. Au cours des deux saisons de croissance, la hauteur des plants a aussi été mesurée mensuellement entre mai et octobre. Les mesures de hauteur de plants ont toujours été effectuées par les mêmes observateurs à l'intérieur d'une même année. La méthode consistait à placer une règle d'un mètre à la base du plant (toujours du même côté) et à utiliser une équerre pour lire la mesure à l'aisselle de la plus haute feuille du plant (Figure 5). En parallèle, les stades de développement des plants ont été observés pour certaines périodes.



Figure 4. Prélèvement foliaire pour l'évaluation du statut nutritionnel des plants.



Figure 5. Mesure de hauteur de plants au site expérimental, juillet 2012.

2.5.3 Conditions météorologiques

Les valeurs moyennes de température (2011-2012) près du site expérimental, lors des mois de croissance (mai - octobre), sont présentées au Tableau 5. Les précipitations (2011-2012) ont été enregistrées en continu (pluviomètre HOBO, modèle RG3-M) et sont rapportées dans ce même tableau. En général, la saison 2011 a connu des précipitations bien réparties, tandis que celle de 2012 a été caractérisée par un printemps hâtif et un été chaud et sec, tel que l'on peut observer aux Figure 6 et Figure 7.

Tableau 5. Conditions météorologiques au site expérimental

Mois	Températures moyennes*				Précipitations moyennes	
	2011		2012		2011	2012
	Max (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Min (°C)	(mm)	(mm)
avril	8,3	0,0	10,2	0,9	128,3	68,7
mai	13,4	7,5	18,9	8,1	134,4	94,8
juin	21,7	12,3	22,9	13,6	94,4	141,4
juillet	26,8	15,7	26,5	15,7	152,0	56,2
août	23,2	15,0	26,6	16,1	213,8	74,0
septembre	19,8	11,6	20,6	9,8	98,2	63,0
octobre	12,0	5,2	11,8	4,7	95,6	127,0

* Données de pluviométrie avril, mai et octobre 2011 et avril et octobre 2012 et de températures sur <http://www.climat.meteo.gc.ca>; autres données mesurées au site expérimental.

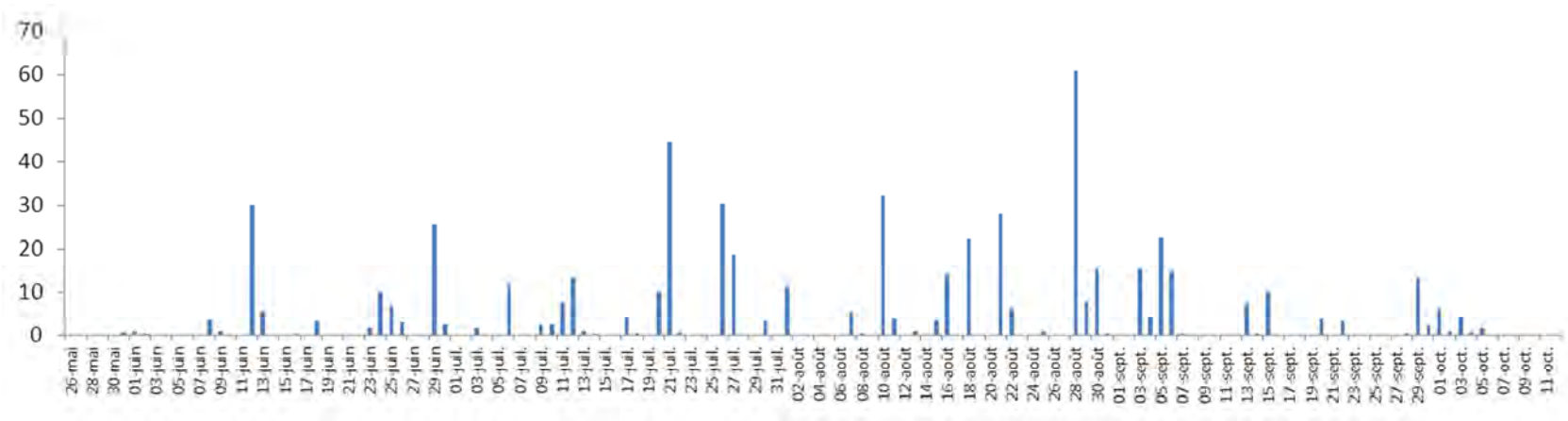


Figure 6. Pluviométrie (mm) au site expérimental du 26 mai au 11 octobre 2011.

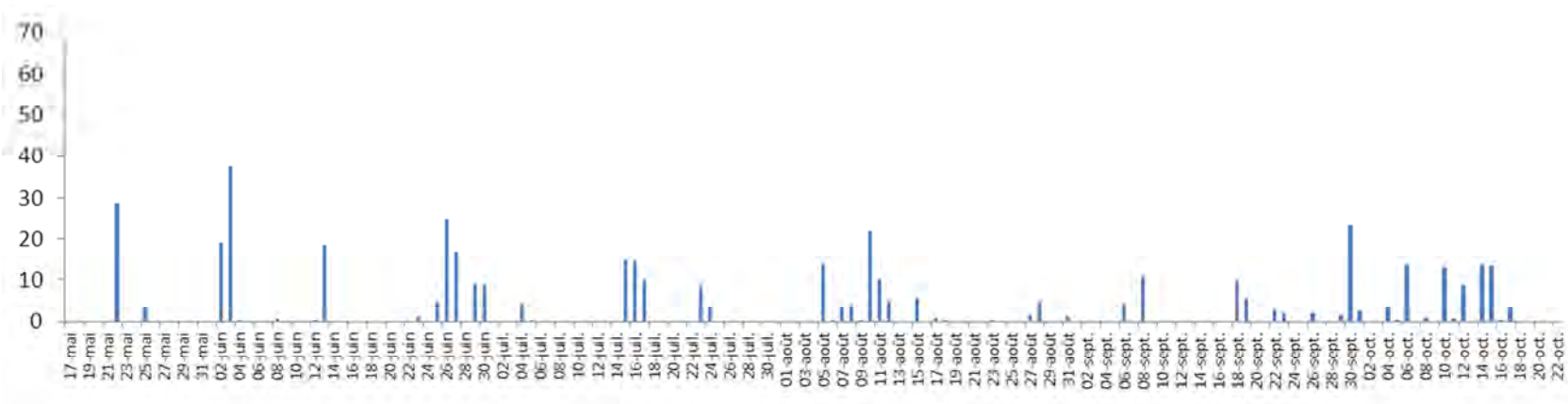


Figure 7. Pluviométrie (mm) au site expérimental du 17 mai au 22 octobre 2012.

2.5.4 Suivi des conditions hydriques du sol

Dans le cadre de ce projet, l'irrigation était effectuée selon la régie du producteur. Huit et 12 irrigations ont été effectuées en 2011 et 2012, respectivement. Chacun des épisodes était d'une durée approximative de 120 minutes. Dans le but de suivre le devenir et la disponibilité de l'eau du sol en temps réel, un tensiomètre (Hortau TX-80) a été installé dans chacune des parcelles à une profondeur correspondant à celle de la zone racinaire des plants. Le tensiomètre était positionné sur la ligne de plants, équidistant entre deux plants (Figure 8).



Figure 8. Exemple de positionnement des tensiomètres au site expérimental, juillet 2011.

3 RÉSULTATS ET ANALYSE

3.1 Propriétés au site expérimental

Selon le tableau de la distribution des teneurs en K, Ca et Mg des sols du Québec extraits selon la méthode Mehlich-3 par région administrative (CRAAQ, 2010), le sol sur lequel les essais ont été réalisés possède une richesse en Ca et Mg se situant entre le 50^e et le 75^e percentile de l'ensemble des sols de la région de la Capitale-Nationale et une teneur en K au-dessus du 75^e centile. Il est donc intéressant de constater que l'étude s'est déroulée dans un sol représentatif, doté de propriétés pouvant s'appliquer à plusieurs sols de la région puisque que ses teneurs en K, Ca et Mg Mehlich-3, présentées antérieurement au Tableau 1, se situent autour des valeurs médianes rencontrées pour ces éléments.

3.2 Propriétés des amendements

La caractérisation des amendements en laboratoire, présentée au Tableau 3, a permis de constater que les composts contenaient des quantités appréciables de N, P et K disponibles et totaux, comblant la plupart du temps entre 85 et 100 % de l'apport total effectué, à l'exception du P₂O₅ du compost de résidus verts, lequel n'apportait que 40 % des apports totaux. En comparaison, pour un volume égal d'amendement apporté dans le sillon, la mousse de tourbe et la fibre neuve de noix de coco n'ont comblé en moyenne que 10 % de l'apport total en N disponible et moins de 1 % de l'apport total en P₂O₅ et K₂O. À la lumière de ces résultats, il apparaît donc que l'apport à l'implantation de composts ne devrait pas être vu uniquement comme un ajout de MO structurante, mais également comme un apport sur le moyen et long terme d'éléments nutritifs. De surcroît, l'apport de mousse de tourbe et de fibres de noix de coco, pour être intéressant, devra pouvoir montrer un avantage sur d'autres aspects, car une plus grande part d'engrais minéral doit être apportée pour combler les besoins de la culture. Pour ce qui est du Mg et du Ca, le même rapport de force s'impose entre les composts et les deux autres amendements.

3.3 Nutrition et développement des plants

3.3.1 Hauteur et croissance des plants

Le suivi des hauteurs de plants (Figure 9 et Figure 10) révèle que certains se sont développés plus que d'autres. Ainsi, en 2011, dès la mi-juillet, les plants fertilisés uniquement à l'engrais minéral (TÉMOIN) tendent à se démarquer à la hausse, tandis que ceux des parcelles amendées à la fibre de noix de coco (FCOCO) présentent le plus faible gain en hauteur. En 2012, une situation similaire se reproduit, bien que les plants aient été rabattus au printemps. Ainsi, les plants TÉMOIN présentent une des meilleures croissances, tandis que les plants FCOCO ont produit une des moins bonnes. De plus, il est intéressant de constater que les plants des parcelles amendées avec le compost de résidus verts (CVERT) rattrapent ceux des parcelles TÉMOIN. Ce rattrapage pourrait indiquer que le CVERT, suivant la première année de contact avec le sol, commence déjà à se minéraliser à un taux qui supporte une bonne croissance des

plants. Ce n'est toutefois pas le cas avec le fumier de bovin (CFUM). Quant à la FCOCO, la croissance moins grande des plants est probablement associée au fait que cette fibre a un C/N excessivement élevé (C/N = 86), causant potentiellement une immobilisation de l'azote disponible. La même explication peut sans doute s'appliquer à la mousse de tourbe qui présente également un C/N élevé (C/N = 43). On peut également se demander si ces matières, au fort pouvoir absorbant, n'ont pas fait compétition avec la culture pour l'eau disponible.

Étant donné, tel que mentionné précédemment, que les plants n'avaient pas tous la même hauteur initiale, l'analyse statistique a été faite sur le gain net en hauteur des plants. Toutefois, puisque les plants ont été rabattus au printemps 2012, il n'était pas pertinent de comparer la hauteur finale de 2012 avec la hauteur en début de projet au printemps 2011. L'analyse a donc porté sur le gain net de chacune des années. En 2011, le résultat de cette analyse révèle qu'il n'y a pas d'effet significatif des traitements sur la croissance nette des plants lors de la première année (Figure 9). Les plants des parcelles amendées avec le CVERT ont aussi eu une croissance nette supérieure de 15 et 27 % à celles des plants des parcelles amendées avec le CFUM ($P = 0.0731$) et la FCOCO ($P = 0.0232$), respectivement. Mais en plus, ces plants ont dépassé ceux des parcelles MTOURBE ($P = 0.0921$) avec un gain net en hauteur 14% plus élevé. Les moins bonnes croissances ont donc été produites par les plants CFUM, mais surtout MTOURBE et FCOCO, présentant le moins de N disponible et le plus fort C/N (Tableau 3 et Tableau 4). L'utilisation du CVERT comme amendement semble donc intéressant puisqu'il n'a entraîné aucun effet négatif sur la croissance des plants, d'autant plus que le développement des plants s'est accentué dès la 2^e saison.

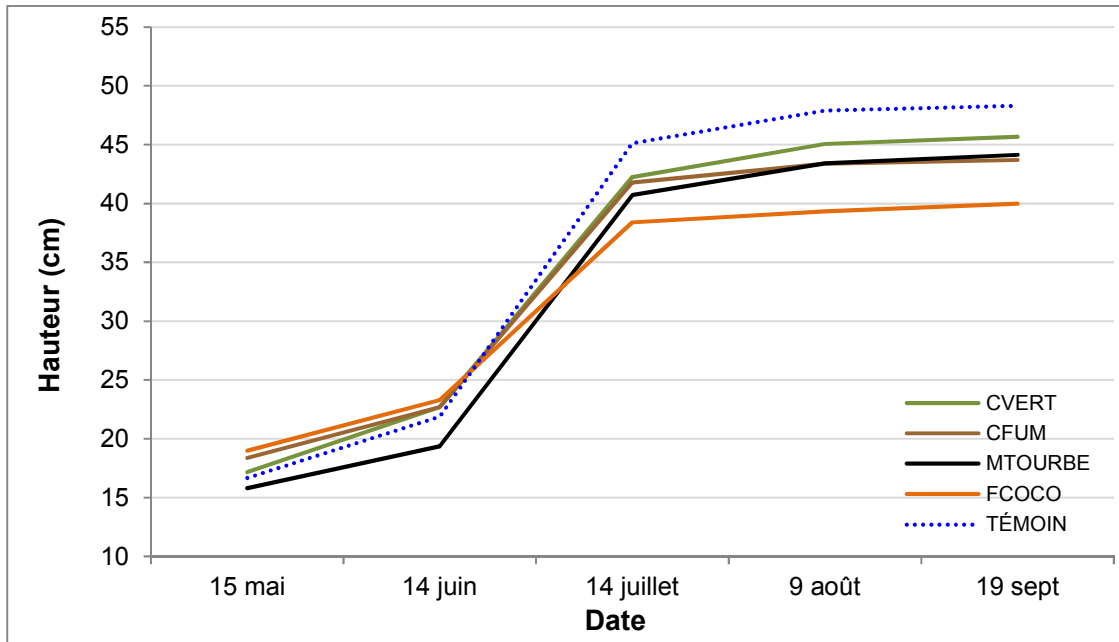


Figure 9. Hauteurs moyennes des plants selon l'apport d'AO ou d'engrais minéraux, été 2011.

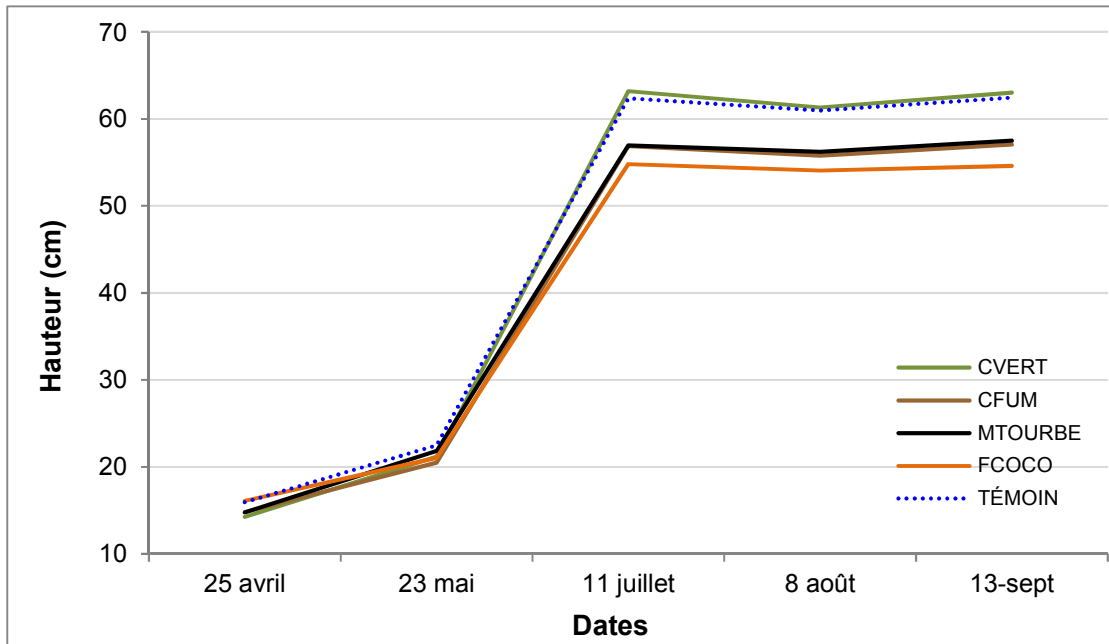


Figure 10. Hauteurs moyennes des plants selon l'apport d'AO ou d'engrais minéraux, été 2012.

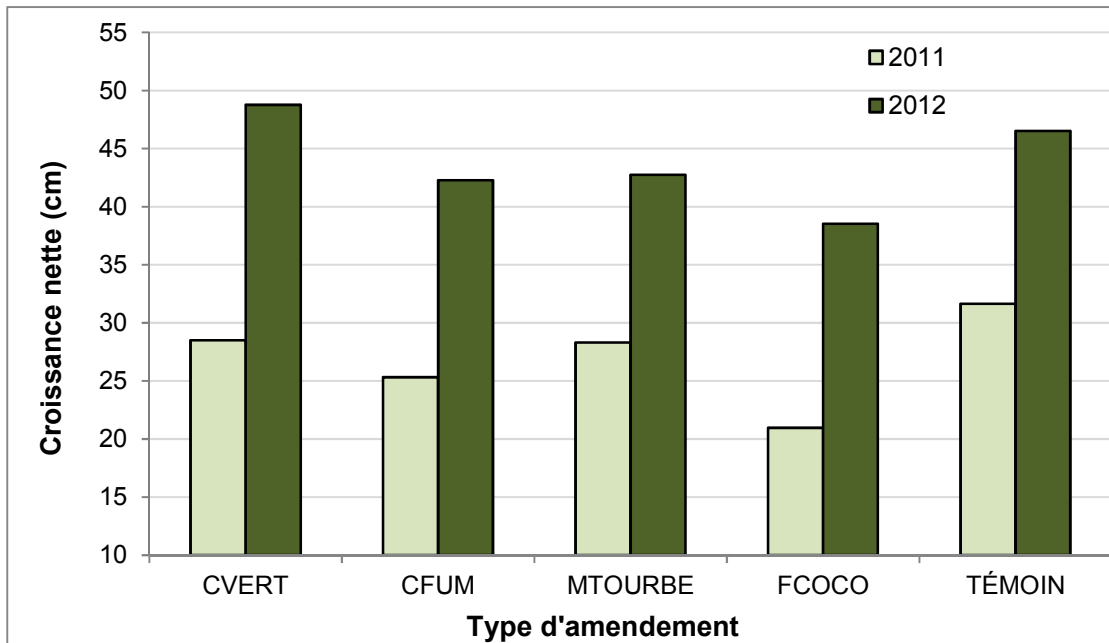


Figure 11. Croissance nette des plants sur la saison en 2011 et 2012 selon l'apport d'AO ou d'engrais minéraux.

Les stades phénologiques ont également été suivis au long de cette étude. Toutefois, les plants ne présentaient aucune différence à ce niveau, quel que soit le traitement. Ainsi, en 2012, avant la taille, les plants présentaient tous un stade uniforme correspondant à la deuxième feuille déployée (C2). Trois semaines après la taille, ceux-ci avaient tous atteint le stade C5. La période de croissance la plus active des plants a été observée entre la fin mai et la mi-juillet. Ceci concorde avec le fait qu'à partir de la fin-juin, la croissance des tiges ralentit avec la diminution de la durée du jour (FPMBQ, 2009).

3.3.2 Nutrition des plants

Étant donné que les divers AO testés présentaient un potentiel de fertilisation différent, allant de plus élevé pour les composts à très bas pour les matières plus résistantes, des analyses foliaires ont été effectuées en cours de saison afin de voir l'impact de l'apport d'AO sur la nutrition des plants. L'analyse foliaire est en effet reconnue comme une des mesures les plus appropriées pour déterminer le statut nutritionnel du plant puisqu'elle est la résultante de la capacité d'absorption par la plante et de la disponibilité des nutriments du sol (Niskanen, 2002). En 2011, un seul des trois échantillonnages prévus a pu être réalisé. Au printemps, les plants étaient trop petits pour que des feuilles soient prélevées sans que cela ne les affecte, tandis qu'à l'automne, le feuillage était trop abîmé par des dommages d'insectes et la prédominance de la rouille. L'analyse foliaire de la mi-juillet a toutefois permis de constater que bien que les AO aient été en contact avec le sol une partie de l'automne en 2010 et 3 mois depuis le dégel en 2011, ceux-ci n'ont pas entraîné de modification du statut nutritionnel en éléments majeurs et mineurs des plants (Tableau 7). Ainsi, bien que la quasi-totalité du N à l'implantation ait été apporté par les AO dans les parcelles CVERT et CFUM (Tableau 4), cela n'a pas entraîné de baisse de la nutrition azotée des plants comparativement au traitement TÉMOIN. Le même constat s'applique aussi aux P et K, même pour les plants ayant reçu 100 % de ces apports à l'implantation par le CFUM ou une grande part par le CVERT (Tableau 7). Même la très grande variation des apports en Ca et Mg, due aux quantités très diverses de chacun contenues dans les AO, ne s'est pas reflétée dans les analyses. Les trois analyses saisonnières de 2012 viennent appuyer celles de 2011 (Tableau 6 et Tableau 7). Ainsi, deux ans et demi après leur application, l'utilisation d'AO très divers ou leur non emploi, n'a pas entraîné de différence nutritionnelle en N, P, K, Ca et Mg des plants.

Puisqu'il n'existe présentement aucune grille de valeurs de références en éléments foliaires pour la culture du cassis en conditions culturales québécoises, les valeurs références nord-américaines de l'Ontario, pour le bleuet en corymbe et le framboisier (MAAARO, 2013), et du Québec, pour la culture du framboisier (CRAAQ, 2010), ont servi de guide. Le Tableau 8 résume les fourchettes de concentrations tirées de ces deux sources. Selon ces valeurs de référence, les différents diagnostics foliaires n'ont révélé aucune carence nutritive chez les plants étudiés, que ce soit pour le N, le P, le K, le Ca ou le Mg qui présentent tous des teneurs qui demeurent à l'intérieur des fourchettes de valeurs acceptables. Toutefois, les teneurs en N_{tot} sont demeurées en tout temps près de la limite inférieure recommandée. Les quantités d'N apportées à l'implantation étaient ainsi peut-être insuffisantes puisqu'en moyenne 57 kg ha^{-1} d'N efficace ont été apportés au sol, tandis que les recommandations actuellement disponibles sont de 90 kg N ha^{-1} , soit $5 \text{ g de N plant}^{-1}$ avant plantation, suivi de $10 \text{ g de N plant}^{-1}$ lors de la plantation (MAAARO, 2013). Pour une densité de plantation correspondant à celle de notre étude, soit $5\,790 \text{ plants ha}^{-1}$, cela équivaut à 30 kg ha^{-1} avant plantation et 60 kg ha^{-1} par la suite. Toutefois,

il aurait été difficile d'apporter plus d'unités de N par les AO puisque l'application d'un volume supérieur en bande sous le plant se serait avérée problématique. L'ajout d'une plus grande part sous forme d'engrais minéral lors de l'implantation à l'automne apparaît également comme moins recommandé étant donné que le prélèvement en N des plants à ce stade est très limité de par leur faible enracinement et le refroidissement des températures. Le N étant facilement lessivable, la part supplémentaire de N minéral apportée risquerait ainsi d'être perdue avant son prélèvement par les plants le printemps suivant. Le producteur apportant dès la première année de production du N par fertigation en saison, la meilleure solution serait probablement d'ajuster cet apport. Par ailleurs, il se peut aussi que d'autres facteurs liés aux conditions de sol ou climatiques soient intervenus.

Tableau 6. Teneurs foliaires en N_{tot} des plants de cassis selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, en 2011 et 2012.

Traitements	Azote (%)			
	2011		2012	
	<i>mi-juillet</i>	<i>fin mai</i>	<i>mi-juillet</i>	<i>mi-août</i>
CVERT	1,8	4,2	1,9	1,7
CFUM	1,7	4,1	1,8	1,6
MTOURBE	1,7	4,2	1,7	1,6
FCOCO	1,6	3,9	1,7	1,6
TEMOIN	1,8	4,2	1,8	1,7

Tableau 7. Teneurs foliaires en P, K, Ca et Mg des plants de cassis selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, en 2011 et 2012.

Traitements	P	K	Ca	Mg
	%			
2011				
CVERT	0,44	1,9	1,3	0,30
CFUM	0,40	1,8	1,3	0,30
MTOURBE	0,39	1,8	1,2	0,30
FCOCO	0,40	1,9	1,3	0,31
TEMOIN	0,41	1,8	1,2	0,29
2012				
CVERT	0,47	1,9	1,4	0,32
CFUM	0,44	1,9	1,4	0,33
MTOURBE	0,44	1,9	1,4	0,33
FCOCO	0,44	1,9	1,5	0,35
TEMOIN	0,44	2,0	1,4	0,32

Tableau 8. Fourchettes des teneurs en éléments nutritifs des feuilles adaptées pour le cassis.

Éléments	Bleuet en corymbe (MAAARO)	Framboisier (MAAARO)	Framboisier (CRAAQ)
	-----%		
N	1,70 - 2,30	2,00 - 3,50	2,5 - 4,0
P	0,15 - 0,40	0,20 - 0,50	0,2 - 0,6
K	0,36 - 0,70	1,00 - 2,00	1,0 - 3,0
Ca	0,30- 0,80	0,80 - 2,50	0,5 - 2,5
Mg	0,12 - 0,30	0,25 - 0,50	0,25 - 1,00

Source : MAAARO (2013) et CRAAQ (2010)

3.4 Évolution des éléments fertilisants et de l'activité biologique du sol

3.4.1 pH du sol

Le suivi sur deux ans du pH des parcelles révèle que seul l'apport de CVERT et de la FCOCO a eu une influence sur ce paramètre en comparaison des autres traitements. En 2011, le pH de tous les traitements augmente entre le printemps et l'automne (Date à $P = 0.0012$) et bien que la différence entre le CVERT et les autres traitements ne soit pas significative (Trait à $P = 0.1581$), celui-ci tend à se démarquer de tous les autres traitements. D'ailleurs, dès la 2^e année de croissance, la différence s'accroît dans le même sens que la 1^{ère} année et le pH du sol amendé avec le CVERT devient supérieur à celui de tous les autres traitements ($P = 0.0417$ - 0.0014) (Figure 12) et passe donc de 5,9 à 6,6 en l'espace de 26 mois (Date à $P < 0.0001$). Selon les recommandations de l'Ontario pour la culture du cassis (MAAARO, 2013), il peut être nécessaire de chauler le sol pour en élever le pH à 6,1 car, bien qu'un pH qui se situe entre 5,5 et 7,0 soit acceptable, un pH qui se situe entre 6,1 et 6,6 est préférable. Par ailleurs, bien que la FCOCO n'ait pas entraîné de différence au cours de la 1^{ère} saison par rapport au CFUM, à la MTOURBE et au TÉMOIN minéral, lors de la 2^e saison le pH du sol FCOCO se différencie également du CFUM ($P = 0.0562$) et du TÉMOIN ($P = 0.0962$), la différence avec la MTOURBE n'étant pas significative. L'effet du FCOCO est toutefois à l'opposé du CVERT, avec une baisse de 5,9 à 5,7 du pH (Date à $P < 0.0001$) au bout des deux années. Il y a donc une différence de presque une unité de pH selon que les sols aient été amendés avec du CVERT ou de la FCOCO. Le pH plus faible de la FCOCO (pH = 5,7) comparativement au CVERT (pH = 7,2) et au CFUM (pH = 6,4) a probablement contribué à la baisse du pH du sol de la zone amendée. Lorsque l'engrais minéral seul a été utilisé ou le CFUM ou la MTOURBE, le pH est similaire avec une valeur moyenne finale de pH de 6,1.

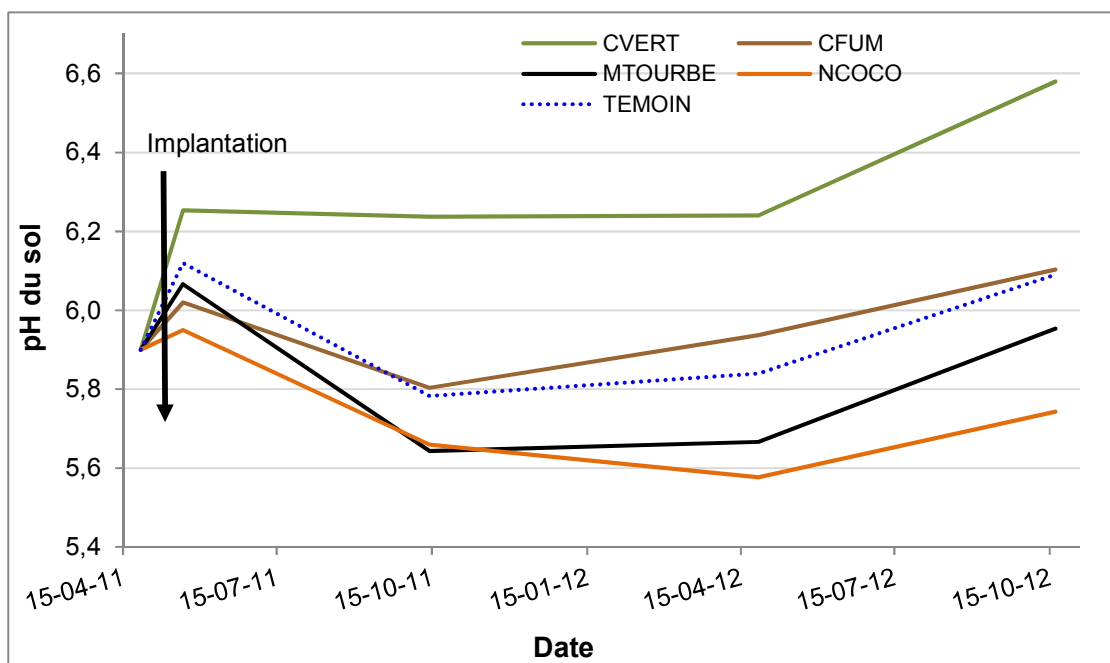


Figure 12. Évolution du pH du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.

3.4.2 Rapport C/N, C et N totaux en (%)

L'apport d'AO est souvent conseillé afin d'augmenter le contenu en carbone (C) du sol. Il est en effet conseillé de maintenir une teneur en MO supérieure à 3 - 4 % dans les sols minéraux afin d'éviter d'affecter le rendement des cultures (CRAAQ, 2010). Selon le suivi du C/N du sol sur les deux années (Figure 13) on constate qu'effectivement la décision d'ajouter un AO à l'implantation sur le rang a haussé le contenu en C par rapport au N dans les sols (2011, Trait à $P = 0.0006$; 2012, $P = 0.0009$). Ainsi, dès la 1^{ère} saison, le sol des parcelles non amendées présente un C/N inférieur ($P = 0.0012-0.0001$) et cette différence se maintient jusqu'à la fin de la 2^e saison ($P = 0.0110-0.0001$), alors que le sol fertilisé uniquement à l'engrais minéral à un C/N de 10,9, tandis que les sols amendés ont un C/N moyen de 13,2. L'emploi de la FCOCO, dont le C/N est particulièrement élevé, a d'ailleurs causé la plus forte augmentation la 1^{ère} année. Toutefois, plus rapidement que prévu, la différence entre les parcelles FCOCO et celles des autres AO s'est amenuisée.

L'analyse séparée de la teneur en C et N totaux du sol révèle que ce n'est pas tant le N qui fait changer le rapport entre le carbone et l'azote du sol mais le C. En effet, si le N total s'élève un peu suivant les apports d'AO, mais pas dans le sol TÊMOIN, les valeurs restent stables par la suite pour tous les traitements, jusqu'en automne 2012 où seul le sol amendé avec le CVERT semble présenter un pourcentage plus élevé de N, mais la différence n'est pas significative ($P = 0.2036$ vs CFUM, $P = 0.0675-0.1012$ vs MTOURB, FCOCO et TÊMOIN). Par contre, dans le cas du C, les sols amendés avec les AO présentent vraiment plus de C que le sol n'ayant reçu que de l'engrais minéral (Interaction Date x Trait à $P = 0.0298$).

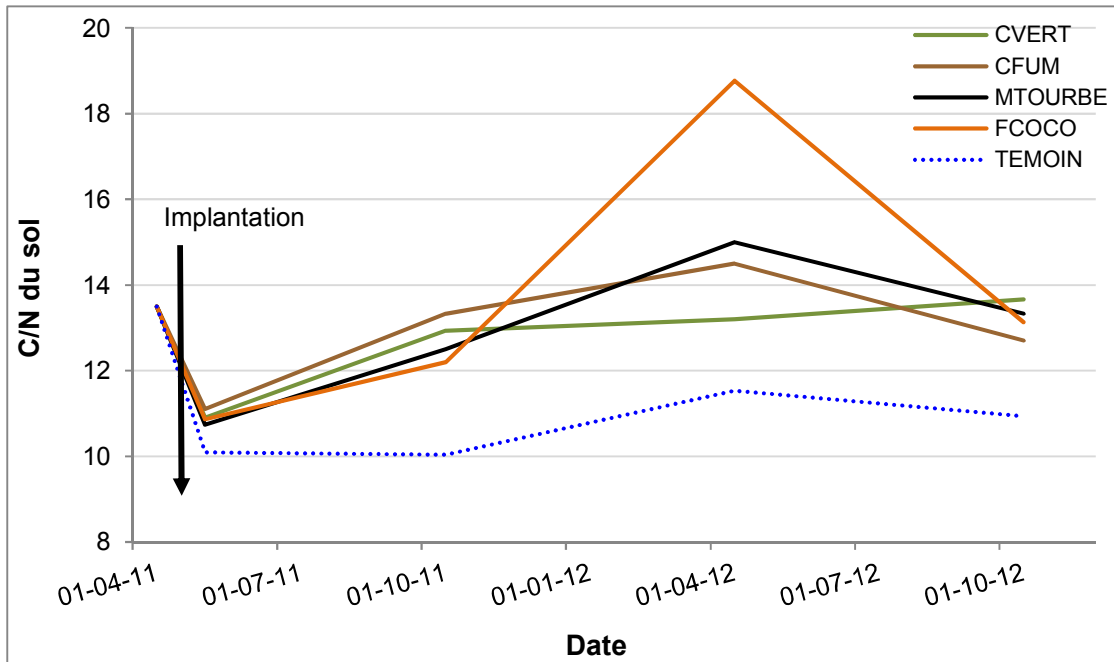


Figure 13. Évolution du C/N du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.

3.4.3 Activité biologique des sols et fourniture en azote

Il est largement admis dans la littérature que l'apport de MO dans un sol stimule l'activité microbienne générale de ce sol. La mesure du dégagement de CO_2 lorsque le sol est incubé est une mesure indirecte de cette activité. Elle révèle, dans cette étude, que les sols ayant reçu des AO ont effectivement un taux respiratoire plus grand que le sol TÉMOIN non amendé lors de la période du pic de minéralisation microbienne dans les sols à la mi-juillet. Le type d'AO a toutefois fait une grande différence (Figure 14). De plus, cet effet a été de courte durée. Dès la 2^e saison de croissance, les taux respiratoires sont tous les mêmes. L'effet bénéfique de l'apport d'AO sur le taux d'activité biologique général des sols semble donc beaucoup plus limité dans le temps que ce qui est habituellement anticipé. De plus, il était attendu que la FCOCO, avec son C/N de 86, soit l'AO stimulant le moins l'activité biologique du sol. Cependant, c'est la MTOURBE qui a le moins stimulé la microflore. En fait, la MTOURBE s'est comportée comme une matière inerte, n'occasionnant aucun effet sur le taux respiratoire des sols, avec un taux comparable à celui du sol TÉMOIN, les deux années. Ainsi, seuls les sols amendés au CVERT, CFUM et FCOCO ont présenté des taux respiratoires différents de celui du sol TÉMOIN et uniquement la 1^{ère} année. Plus en détails, leur taux respectifs, similaires entre eux, étaient du double de celui du sol TÉMOIN (COCO à $P = 0.0782$, CVERT et CFUM à $P = 0.0511-0.0129$) lors de la 1^{ère} saison. À l'image des résultats pour la respiration microbienne, l'uréase, soit l'enzyme impliquée dans la minéralisation du N organique non assimilable par les racines, en azote inorganique disponible à la plante, ne présente aucune différence entre les traitements la 2^e année. De même, lors de la 1^{ère} année, son activité semble différente selon les types d'AO, mais ces différences ne sont pas significatives, car seul l'apport de CVERT tend à avoir augmenté l'activité uréase dans le sol comparativement au sol TÉMOIN ($P = 0.1050$). Ainsi, globalement, l'effet du traitement sort non-significatif ($P = 0.3244$).

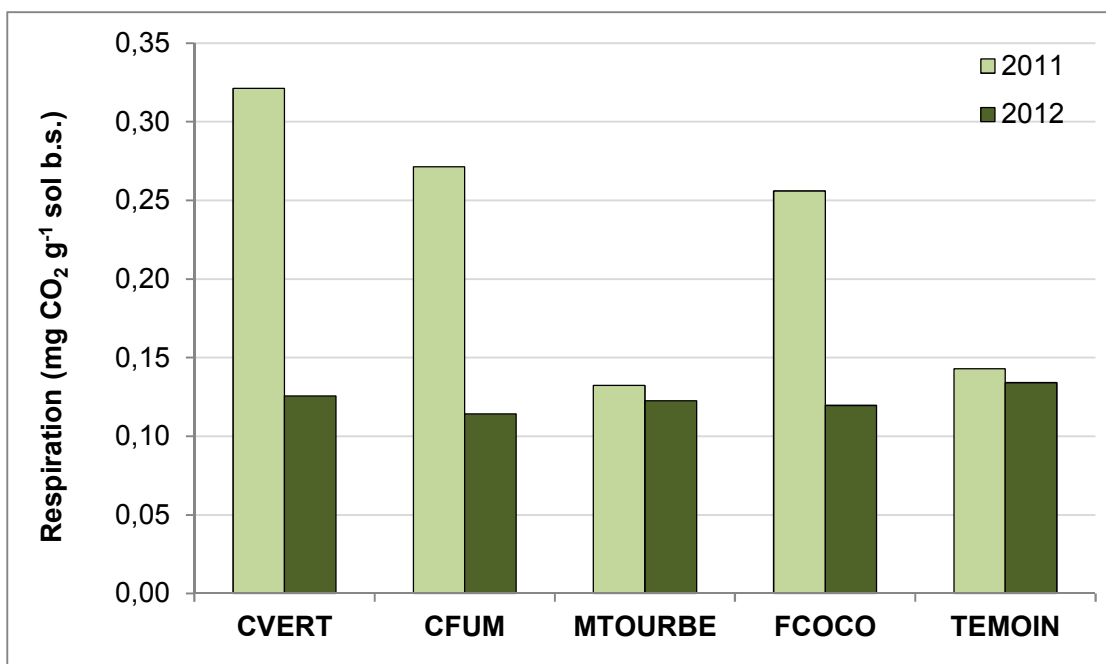


Figure 14. Mesure de l'activité biologique des sols selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.

L'incubation de sol permet de suivre la variation des teneurs en N-NH₄ et N-NO₃ du sol qui survient sur un certain laps de temps lorsque le sol est mis à incuber sous des conditions très favorables à l'activité microbienne. Cette mesure indique si un sol a plutôt tendance à relâcher du N ou à être immobilisant. Par ailleurs, même si l'incubation a été réalisée sur du sol prélevé en automne, elle donne tout de même une bonne idée de la capacité des sols en saison à fournir du N inorganique assimilable par la culture par minéralisation. En effet, la microflore des sols y demeure et si son activité est réduite en automne, c'est à cause de la baisse des températures. L'incubation, en soumettant les sols à une température imitant ce qui survient en été, permet donc de simuler l'activité de minéralisation qui survient en cours de saison. Ainsi, après 26 mois d'interaction sol-amendement, l'incubation de sol effectuée à l'automne 2012 indique des différences dans le potentiel de relâchement de N inorganique en fonction des types d'amendements (Figure 15). Toutefois, l'impact des traitements ne ressort significatif que pour le N-NO₃ (Trait à $P = 0.0469$). Ainsi, les sols amendés au CVERT et TÉMOIN relâchent une quantité similaire moyenne de 1,5 mg N-NO₃ kg⁻¹ de sol sec. Lorsque cette concentration est rapportée par hectare pour une strate de sol de 0,17 m de profondeur, on constate que ces sols peuvent donc relâcher dans de bonnes conditions 3,26 kg N-NO₃ ha⁻¹ (b.s.) sur 10 jours. Les sols amendés avec le CFUM et la MTOURBE, qui relâchent tous deux la même quantité de N-NO₃, en produisent trois fois moins que les sols CVERT ($P = 0.0875-0.0640$) et TÉMOIN ($P = 0.0716-0.0524$). Les sols amendés avec la FCOCO, quant à eux, ne relâchent aucun nitrate. Ceci porte à se questionner à savoir si les sols amendés en FCOCO ne pourraient pas être immobilisant. Mais avec un taux de signification de $P = 0.2211$, l'analyse de la variation nette du contenu en N minéral (net azote) au cours de l'incubation ne nous permet pas de l'affirmer (Figure 15). Le fort C/N de la FCOCO et la hausse significative du C et non du N dans ces parcelles appuient cette hypothèse.

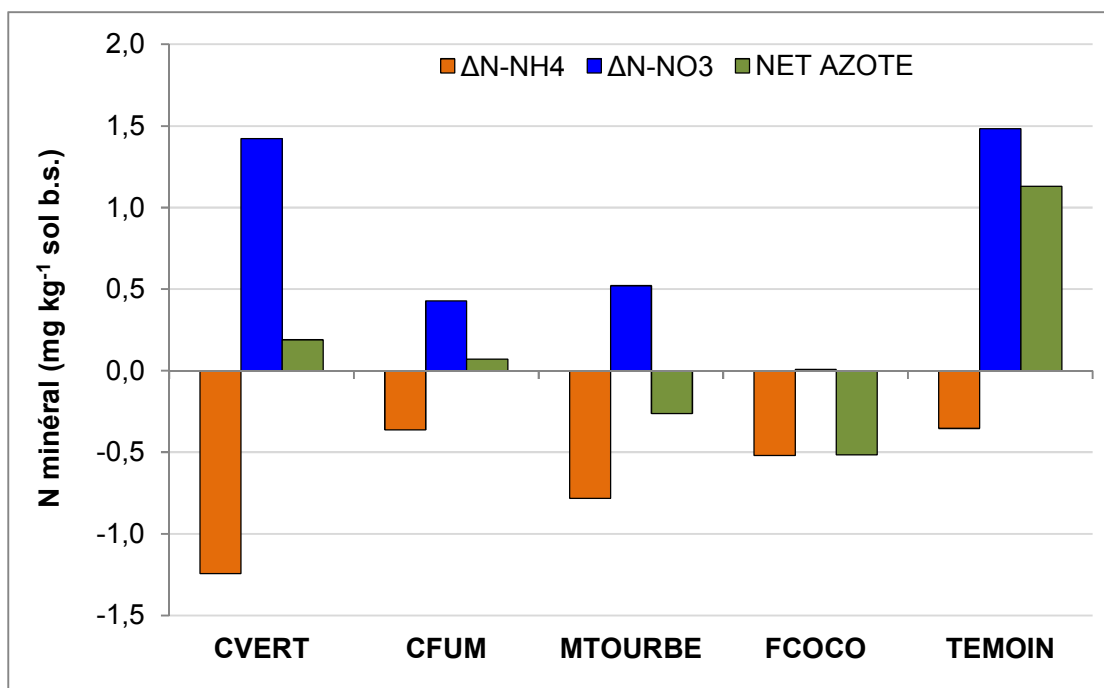


Figure 15. Potentiel de relâchement du N_{Min} selon l'apport d'AO et d'engrais minéral au terme de l'essai.

La mesure des nutriments par saturation du sol à l'eau renseigne sur les quantités de $N\text{-NH}_4$ et de $N\text{-NO}_3$ qui sont dissous dans la solution du sol où les racines puisent leurs nutriments. Autrement dit, il s'agit des concentrations de $N\text{-NO}_3$ et de $N\text{-NH}_4$ que le sol peut maintenir directement disponibles au prélèvement par la culture. Dans le cas du NH_4 , celui-ci devra toutefois être la plupart du temps nitrifié avant d'être utilisé, car la majorité des cultures privilégie l'absorption du N minéral sous forme de nitrate. C'est donc la méthode qui extrait la forme la plus disponible des nutriments. Le premier constat tiré de cette analyse est que les concentrations en $N\text{-NO}_3$ sont huit fois moins grandes en 2012, qu'en 2011, et que celles des $N\text{-NH}_4$ sont six fois moins importantes. Les concentrations mesurées en 2011 doivent ainsi découler en grande partie des formes disponibles déjà contenues dans les AO et les engrais de départ, d'autant plus qu'en 2011, aucun engrais n'a été apporté par fertigation. On voit d'ailleurs qu'il tend à y avoir des différences selon le type d'AO ou d'engrais en 2011. Les teneurs en $N\text{-NH}_4$ tendent à être plus élevées dans les sols amendés avec le CVERT et l'engrais minéral. Toutefois, et c'est le second constat, le $N\text{-NO}_3$ présente des concentrations beaucoup plus élevées, de 89 et 63 fois en 2011 et 2012, respectivement, que celles du $N\text{-NH}_4$. Si on combine les teneurs en $N\text{-NH}_4$ et $N\text{-NO}_3$ pour avoir une idée du N minéral disponible (N_{Min}), les résultats selon les traitements sont donc dictés par les teneurs en $N\text{-NO}_3$, le $N\text{-NH}_4$ jouant un rôle mineur. On constate ainsi que la disponibilité en N_{Min} dans la solution du sol est la même dans tous les sols. Seul celui amendé avec la FCOCO tend à produire des concentrations 1,4 fois moindre, mais la différence est non significative à $P = 0.05$ (Figure 16). En 2012, tant les teneurs en $N\text{-NH}_4$ qu'en $N\text{-NO}_3$ sont les mêmes, quel que soit le traitement. Ceci suggère qu'elles sont entretenues principalement par les fertigations qui fournissent les mêmes concentrations en N_{Min} pour toutes les parcelles.

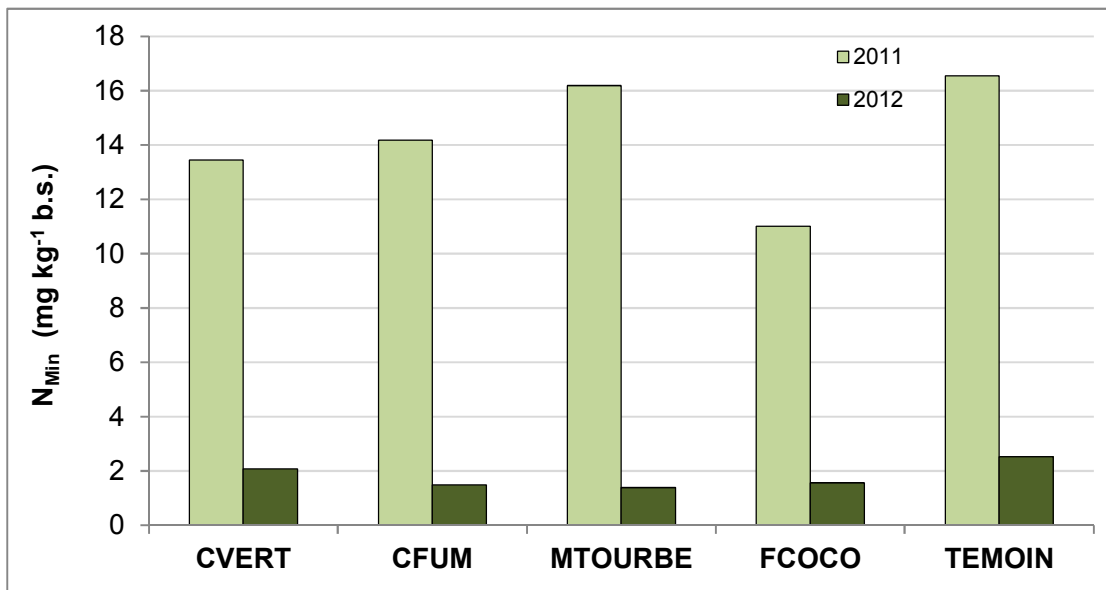


Figure 16. Concentrations en N_{Min} dans la solution du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.

3.4.4 Évolution du P, K, Ca et Mg Mehlich-3 et SSE

Lors du premier échantillonnage au printemps 2011, les teneurs en P_{M3} du sol semblaient s'être relativement abaissées par rapport aux valeurs de P_{M3} du sol d'origine. Toutefois, cela est dû au fait que la densité des sols a été diminuée par les opérations culturales lors de l'implantation. Puisque le calcul des charges de P en $kg\ ha^{-1}$ utilise la MVA, le sol semble en apparence s'être appauvri en P. Cependant, le suivi du P potentiellement disponible du sol (P Mehlich-3) révèle que la mise en production du site a enrichi significativement (Date à $P = 0.0271-0.0001$) le sol en P dans la bande cultivée (Figure 17). Évidemment, la hausse ne s'est produite que dans les bandes puisque l'espace entre les rangs est demeuré non amendé. Ce résultat fait toutefois ressortir l'importance de fertiliser le sol en bande à l'implantation pour cette culture produite avec de très larges entre-rangs. En effet, exprimée en $kg\ P_{M3}\ ha^{-1}$, les données indiquent un enrichissement en P_{M3} de 39 à 89 $kg\ ha^{-1}$ (sur 20 cm) dans les sols. De tels enrichissements sont non souhaitables dans toutes zones sans plant, donc sans prélèvement de P. D'autant plus que la majeure partie du P total apportée par les AO est non extraite, ni mesurée, dans l'analyse Mehlich-3. Elle n'apparaît donc pas dans les valeurs d'enrichissement en P_{M3} rapportées à la Figure 16, mais elle est bien présente et continuera d'être progressivement transformée, en partie, en P davantage assimilable et donc mesurée dans l'analyse Mehlich-3. Par exemple, dans le cas du CVERT et du CFUM, 31 et 85 $kg\ ha^{-1}$ de P total ont été apportés par l'AO, comparativement à 1,4 et 2,5 $kg\ ha^{-1}$ de P total pour la MTOURBE et la FCOCO. Les deux premiers AO pourraient donc libérer sur un plus long terme du P disponible, conduisant à un plus grand enrichissement en P_{M3} . Dans les bandes cultivées, cette capacité de fourniture en P pourrait s'avérer intéressante si les apports complémentaires en engrais minéraux en tiennent compte. Toutefois, après 26 mois de contact sol-amendement, même si le contenu en P_{M3} des sols amendés semblait en apparence plus haut que celui du sol n'ayant reçu que du P minéral, l'interaction « Date x Trait » ne présente qu'un $P = 0.1502$. Toutefois, la mesure du

P_{SSE} indique bien que la solution du sol s'est significativement enrichie de 1,6 à 2,3 fois en P disponible entre 2011 et 2012 (Figure 18). De plus, si en 2011 le type d'AO n'a pas eu d'impact significatif sur la disponibilité en P_{SSE} , en 2012 les teneurs des sols amendés avec le CVERT et le CFUM sont les plus élevées (Trait à $P = 0.0915$). Ces résultats confirment que les AO ne doivent pas être vu uniquement comme des amendements organiques, mais qu'il faut aussi considérer leurs propriétés fertilisantes au moment de calculer le volume à incorporer et la balance en engrais minéral à apporter. Il n'en demeure pas moins qu'au final, les teneurs moyennes en P_{M3} du sol, soit du phosphore potentiellement assimilable, étaient situées dans la fourchette de valeurs de P assimilable recommandées pour le cassissier, d'environ 225 à 335 $kg\ ha^{-1}$ (FPMBQ, 2009) (Figure 17).

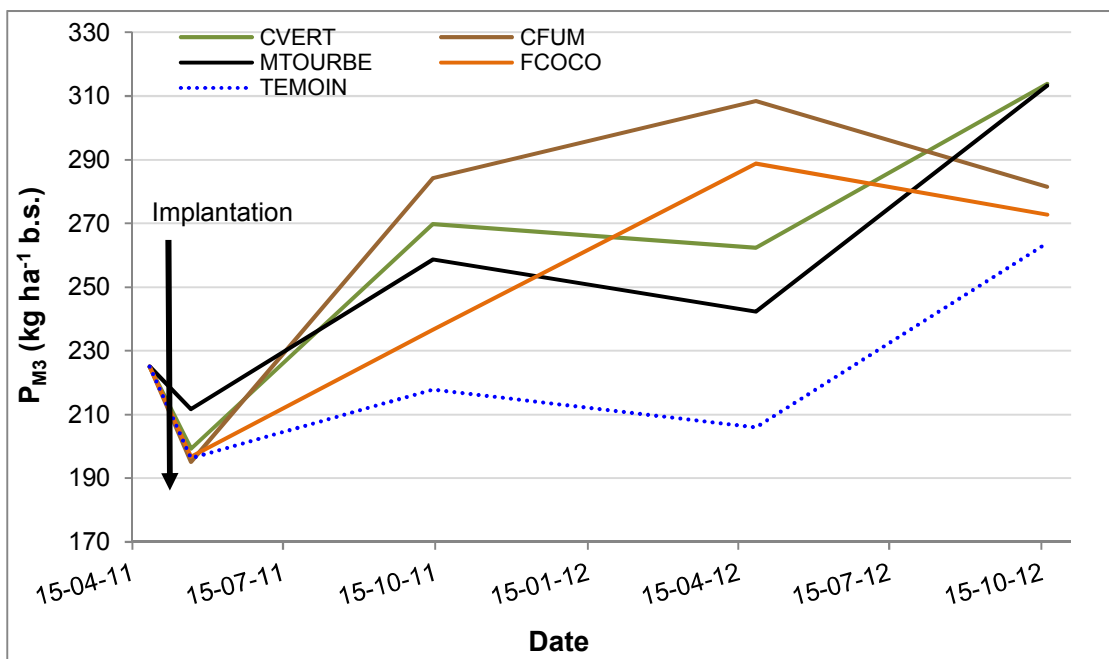


Figure 17. Évolution des teneurs en P_{M3} du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.

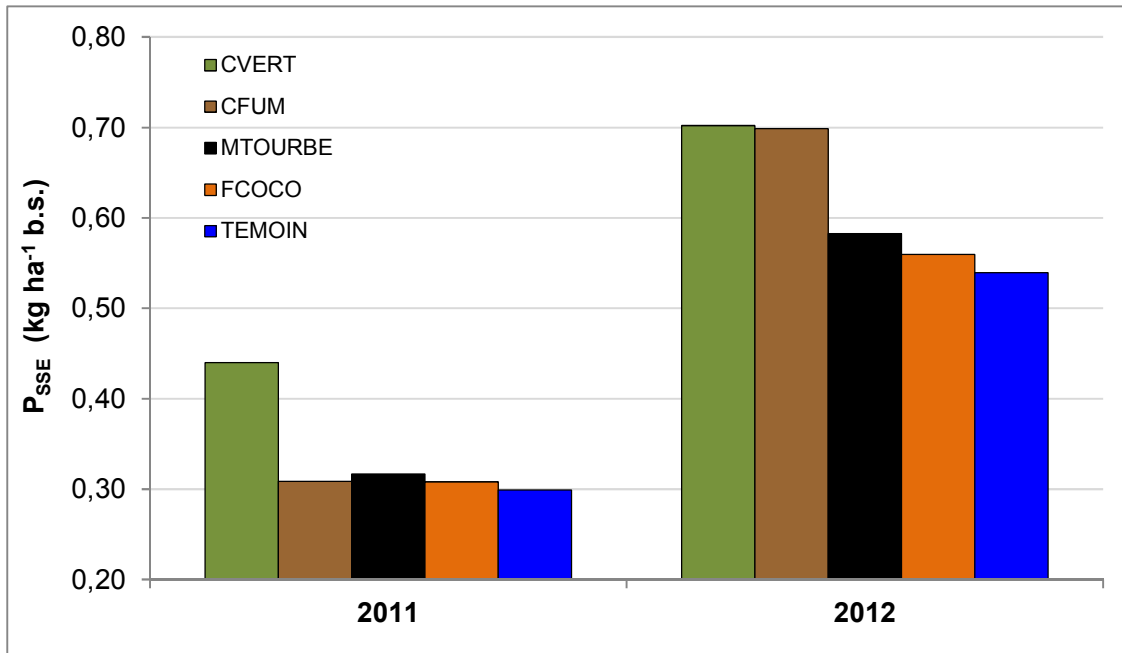


Figure 18. Teneurs en P_{SSE} du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.

Lors du premier échantillonnage au printemps 2011, tel que pour les teneurs en P_{M3} du sol, les valeurs de K_{M3} semblaient s'être abaissées par rapport aux valeurs du sol d'origine. Toutefois, cela est encore une fois dû au fait que la densité des sols a été diminuée par les opérations culturales lors de l'implantation. D'ailleurs, le suivi du K potentiellement disponible révèle plutôt que la mise en production du site a enrichi significativement (Date à $P < 0.0001$) le sol en K dans la bande cultivée (Figure 19). Encore une fois, ce résultat fait ressortir l'importance de fertiliser le sol en bande à l'implantation. En effet, exprimée en $kg K_{M3} ha^{-1}$, les données indiquent un enrichissement de 54 à $183 kg K_{M3} ha^{-1}$ (sur 20 cm) dans les sols, exception faite du sol amendé au CFUM dont les teneurs sont demeurées similaires. Bien que les apports en K ne soient pas touchés par le REA au même titre que le P, il n'en demeure pas moins qu'il est préférable de ne pas en apporter en excès des besoins de la culture. Toutefois, à la différence du P, le K est considéré presque en totalité comme inorganique et efficace dans les AO en général, ce qui devrait donner une hausse relativement rapide et conséquente avec la teneur en K du produit apporté, mais qui pourrait rester plutôt stable par la suite et même rebaisser si des apports adéquats d'entretien en K sont apportés par fertigation. Par exemple, c'est l'apport de CVERT qui contenait le plus de K total, soit un équivalent de $145 kg K total ha^{-1}$, comparativement à des doses entre 88 et $101 kg K total ha^{-1}$ pour les autres traitements. Ce sont effectivement les sols amendés en CVERT qui ont montré la hausse la plus forte et qui contenaient le plus de K_{M3} à l'automne 2012. En fait, la teneur en K_{M3} des sols CVERT était 1,6, 1,3 et 1,2 fois plus élevée que celle des sols CFUM ($P = 0.0123$), MTOURBE ($P = 0.0326$) et TÉMOIN ($P = 0.0485$). Seuls les sols amendés à la FCOCO présentaient une valeur statistiquement égale. C'est d'ailleurs l'AO qui contenait le plus de K total avec une teneur de $4,8 kg T^{-1} b.h.$ (Tableau 3) et celui apportant, avec la part d'engrais minéral complémentaire, la 2^e plus grande dose de K après le CVERT.

Ces résultats confirment à nouveau que les AO ne doivent pas être vus uniquement comme des amendements organiques, mais qu'il faut aussi considérer leurs propriétés fertilisantes au moment de calculer le volume à incorporer et la balance en engrais minéral. En effet, si l'on se réfère aux valeurs recommandées de 225 à 335 kg ha⁻¹ en K assimilable dans le substrat de culture pour le cassis (FPMBQ, 2009), dès l'automne 2011, la richesse en K des sols est bien au-dessus du nécessaire. Ces richesses excessives ne sont pas sans impact pour la culture, comme le démontre les analyses foliaires de cette étude, indiquant que les plants présentent des concentrations foliaires élevées en K, à la limite de la fourchette acceptable, les deux années.

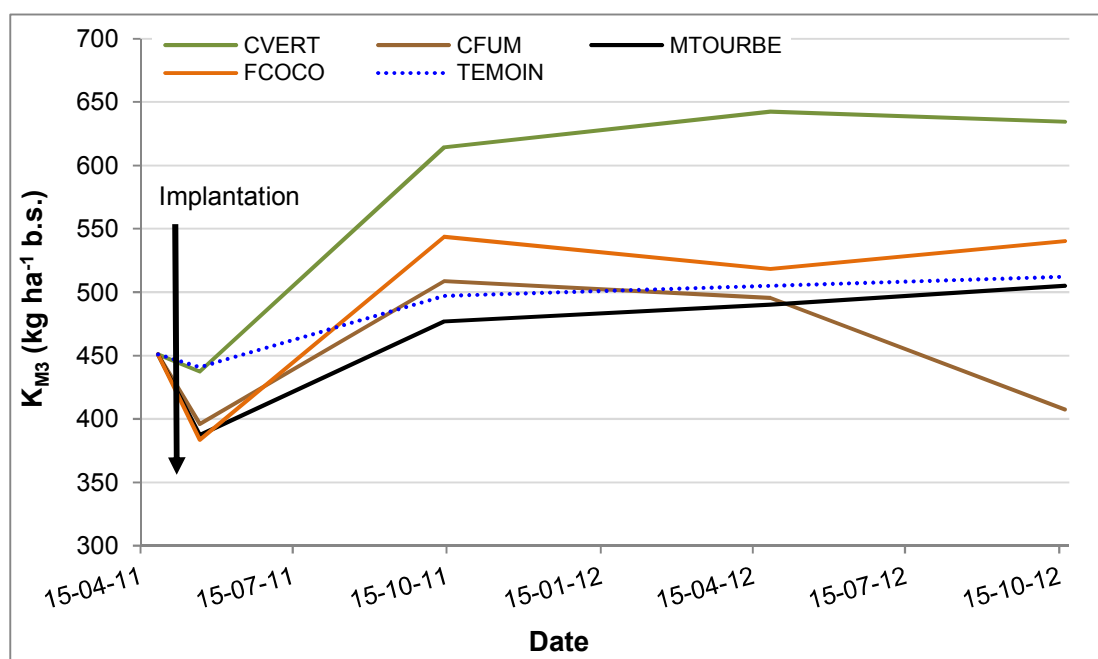


Figure 19. Évolution des teneurs en K_{M3} du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.

Pour sa part, l'analyse du K SSE n'indique aucune différence, ni en 2011, ni en 2012, en fonction des traitements. Par contre, les résultats de l'analyse appuient l'hypothèse que la hausse du K disponible pourrait diminuer à moyen terme si l'effet principal provenait de l'apport des AO puisque les valeurs de K_{SSE} de l'été 2012 ne valent en moyenne que 8 % de celles de l'été 2011.

Des quantités très différentes de Ca et Mg de forme totale ont été apportées par l'ajout des AO. Le CVERT (Ca = 511 kg ha⁻¹ Mg = 53 kg ha⁻¹) et le CFUM (Ca = 477 kg ha⁻¹ Mg = 62 kg ha⁻¹) en ont apporté beaucoup plus que la MTOURBE (Ca = 8 kg ha⁻¹ Mg = 5 kg ha⁻¹) et la FCOCO (Ca = 25 kg ha⁻¹ Mg = 12 kg ha⁻¹). Par contre, la MTOURBE et la FCOCO ont reçu un apport complémentaire beaucoup plus important en engrais 27-0-0, similaire à celui du TÉMOIN, qui contient 5 % de Ca. Toutefois, le 27-0-0 ne vient ajouter que 9,1 kg de Ca et 4,6 kg de Mg pour ces deux derniers AO. Ainsi, bien que le sol d'origine était déjà bien pourvu en Ca_{M3} (4 565 kg ha⁻¹), les traitements ont influencé la teneur en Ca_{M3} et Mg_{M3} du sol des bandes cultivées. En 2011, pour le Ca, il s'agit d'une tendance avec davantage de Ca_{M3} dans les sols

amendés au CVERT que dans ceux ayant reçu la FCOCO, les autres sols présentant des valeurs similaires entre eux et avec le CVERT et la FCOCO. Toutefois, en 2012, le sol CVERT poursuit son enrichissement en Ca_{M3} (Date à $P = 0.0001$) et l'influence de l'apport d'AO sur le contenu en Ca_{M3} du sol devient significative ($P = 0.0300$) (Figure 20). Le sol amendé au CVERT contient ainsi en fin de saison 2012 de 1,3 à 1,4 fois plus de Ca_{M3} que ceux amendés avec le CFUM ($P = 0.0451$), la MTOURBE ($P = 0.0151$), la FCOCO ($P = 0.0035$) et l'engrais minéral ($P = 0.0148$). Par contre, les sols amendés avec les trois autres AO présentent des contenus statistiquement identiques à celui du sol fertilisé à l'engrais minéral. Ce résultat était attendu pour la MTOURBE et la FCOCO puisqu'elles étaient très dépourvues en Ca et avaient reçu la même quantité de 27-0-0. Par contre, le CFUM apportait presque autant de Ca que le CVERT. L'effet calcique ne semble donc pas attribuable qu'au contenu initial en Ca de l'AO. Dans le cas du Mg_{M3} , la situation est similaire, mais moins marquée (Figure 21). À nouveau, l'effet des traitements est non significatif en 2011. De plus, à l'automne 2012, les sols amendés en CVERT contiennent plus de Mg_{M3} uniquement par rapport à ceux amendés en CFUM ($P = 0.0407$), les autres différences n'étant pas significatives. Quoiqu'il en soit, la teneur en Ca et Mg est adéquate dans tous les sols. En effet, les teneurs en Ca ne sont pas sous les $4\ 000\ kg\ Ca\ ha^{-1}$. De plus, les carences en Mg vont se produire surtout dans les sols dont la teneur en Mg_{M3} est inférieure à $100\ kg\ ha^{-1}$ pour les sols sableux et à $150\ kg\ ha^{-1}$ pour les autres textures de sol (CRAAQ, 2010), ce qui n'est pas le cas des sols étudiés.

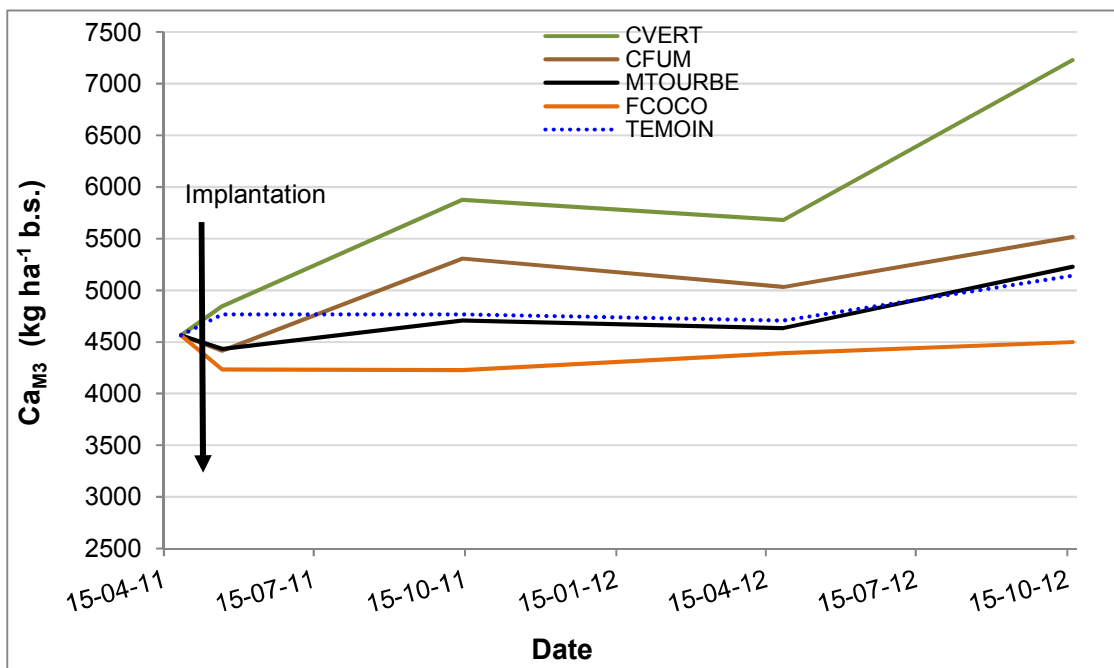


Figure 20. Évolution du Ca_{M3} du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.

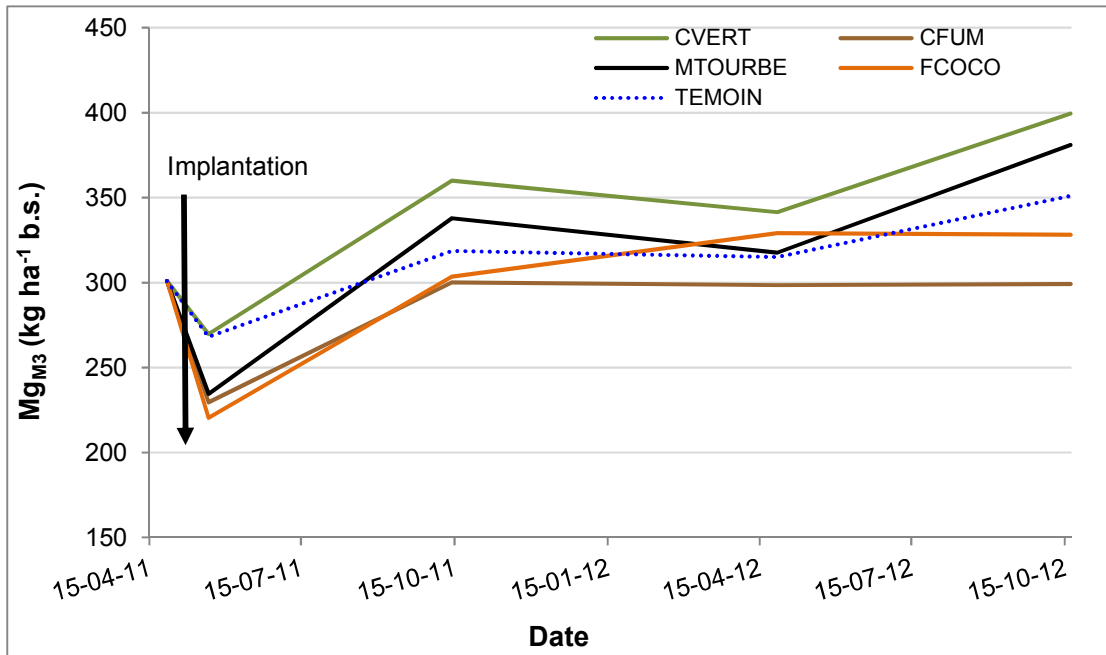


Figure 21. Évolution du Mg_{M3} du sol selon l'apport d'AO et d'engrais minéral, saisons 2011 et 2012.

Tel que pour le P_{SSE} et le K_{SSE} , les concentrations en Ca_{SSE} et Mg_{SSE} ont grandement diminuées entre 2011 et 2012. Dans le cas du Ca_{SSE} , il n'y a pas de différence significative entre les traitements en 2011, mais en 2012 les teneurs en Ca_{SSE} disponible du sol tendent à être liées au type d'AO à l'implantation (Trait à $P = 0.1024$). Ainsi, le contenu en Ca_{SSE} tend à être plus élevé dans les sols fertilisés uniquement à l'engrais minéral, comparativement au CFUM ($P = 0.0183$), MTOURBE ($P = 0.0804$) et FCOCO ($P = 0.0353$) (Figure 22). Par contre, il n'y a pas de différence avec les teneurs mesurées dans les sols amendés en CVERT. Des résultats similaires s'observent aussi dans le cas du Mg (Figure 23). En 2011, il n'y a pas de différence significative entre les traitements. Par contre, à la mi-saison 2012, les teneurs en Mg_{SSE} disponible du sol tendent à être liées au type d'AO à l'implantation (Trait à $P = 0.0651$) et si les sols amendés en CVERT ont une teneur en Mg_{SSE} supérieure à celles des sols amendés en CFUM, la principale différence se situe au niveau des sols fertilisés en engrais minéral seulement qui présentent des teneurs plus élevées en Mg_{SSE} que ceux amendés en CFUM ($P = 0.0106$), MTOURBE ($P = 0.0832$) et FCOCO ($P = 0.0279$). Par contre, encore une fois, les sols TÊMOIN et CVERT ont des concentrations en Mg_{SSE} similaires. L'apport élevé en Ca et Mg totaux provenant du CFUM, très près de celui du CVERT, ne s'est donc pas traduit par une hausse de la fraction en Ca et Mg la plus disponible du sol. De même, les sols amendés en MTOURBE et FCOCO ont reçu pratiquement les mêmes quantités de nitrate calcique ($49,3 - 55 \text{ kg ha}^{-1}$) que le sol TÊMOIN. De plus, ces AO apportaient respectivement 8 et 25 kg ha^{-1} de Ca. Pourtant, la teneur en Ca_{SSE} y est plus faible que dans le sol fertilisé à l'engrais minéral uniquement.

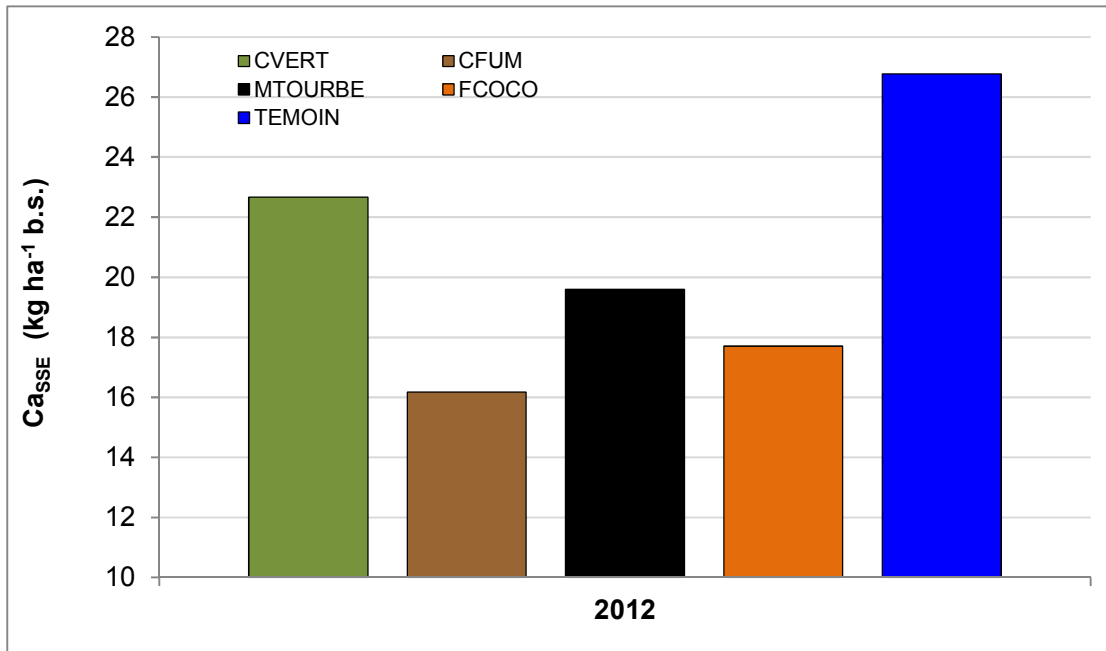


Figure 22. Charges du sol en Ca extrait selon la méthode SSE selon l'apport d'AO et d'engrais minéral en juillet 2012.

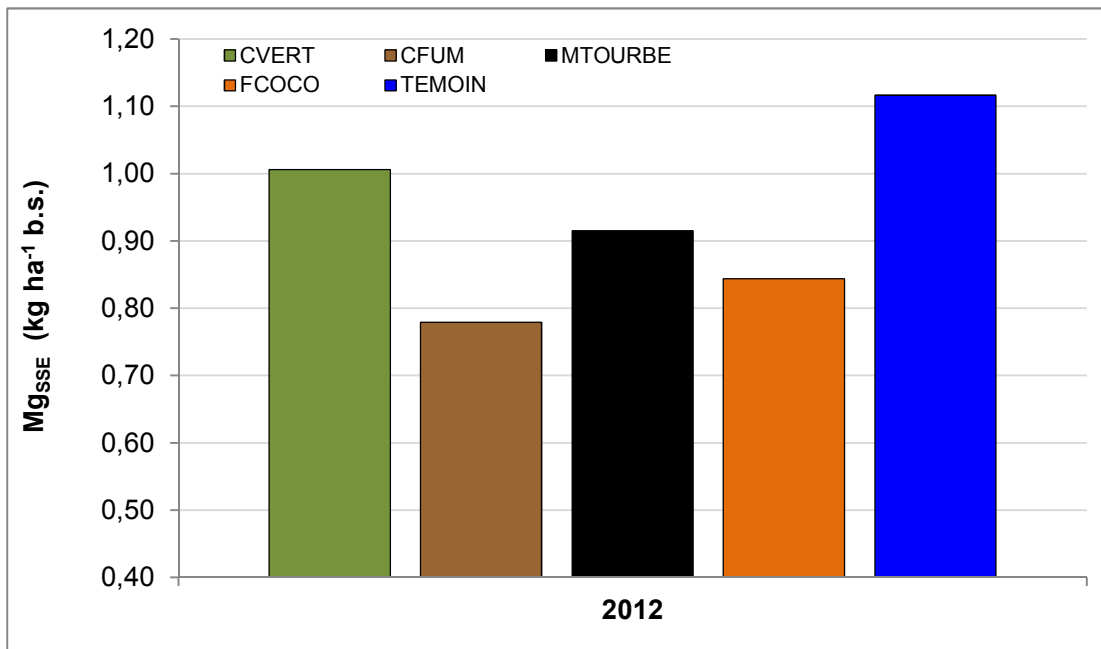


Figure 23. Charges du sol en Mg extrait selon la méthode SSE selon l'apport d'AO et d'engrais minéral en juillet 2012.

3.4.5 Nitrates résiduels

La mesure de nitrate résiduel est un indice du risque de perte de N dans l'environnement suivant la saison de croissance puisque les prélèvements par la culture sont arrêtés et que le nitrate restant est ainsi très susceptible d'être lessivé. Cette étude démontre que le type d'AO utilisé a eu une forte influence sur ces quantités (Trait à $P = 0.0196$). En fait, les teneurs résiduels sont similaires dans les sols amendés avec le CFUM, la MTOURBE, la FCOCO et l'engrais minéral, avec une valeur moyenne de $2,6 \text{ mg N-NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ sol sec}$ (Figure 24). Par contre, la teneur est près de deux fois plus élevée dans les sols amendés avec le CVERT ($4,5 \text{ mg N-NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ sol sec}$). Lorsque ces concentrations sont rapportées par hectare pour une strate de sol de $0,17 \text{ m}$ de profondeur, on constate que $5,61 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ sont à risque de perte dans les sols CFUM, MTOURBE, FCOCO et TÉMOIN. Dans les sols CVERT, c'est $10,0 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$.

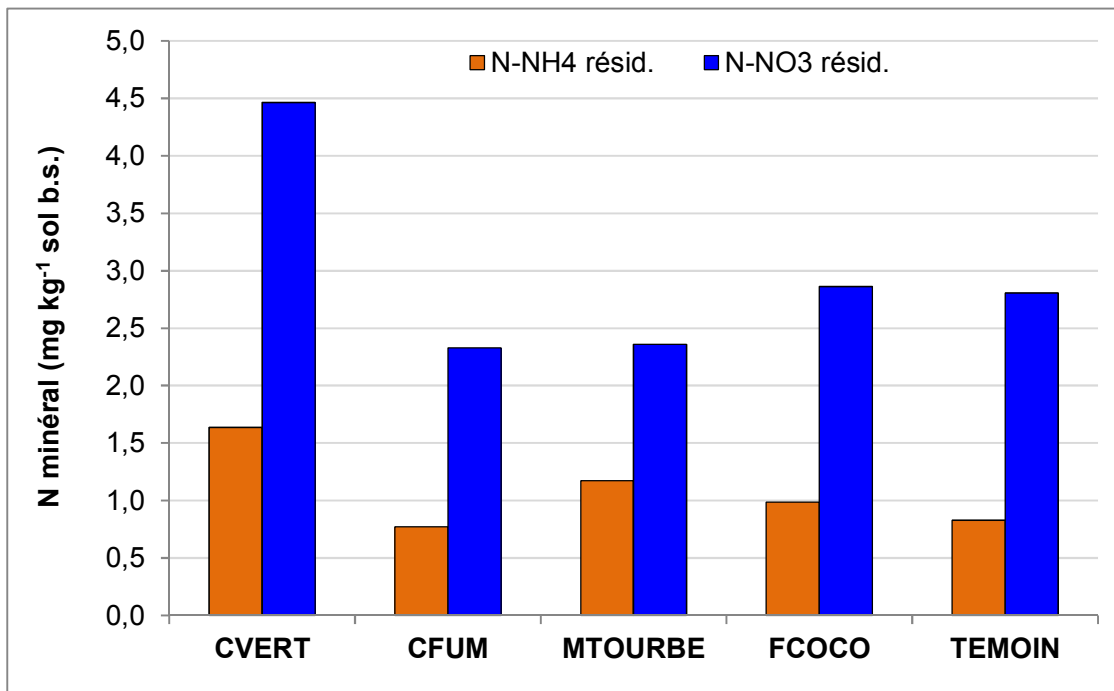


Figure 24. N_{Min} résiduel selon l'apport d'AO ou des engrais minéraux au terme de l'essai.

3.5 Évolution des propriétés physiques du sol

La teneur en eau volumique mise en relation avec la tension de l'eau dans le sol permet de faire ressortir le comportement hydrodynamique d'un sol. Cette relation est illustrée à l'aide d'une courbe de désorption en eau. Les résultats obtenus pour chacun des cinq traitements sont présentés à la Figure 25. Le premier point présenté (0 kPa) correspond à la teneur en eau volumique du sol à la saturation. La tension est alors nulle et selon le traitement, le sol contient entre $0,55$ et $0,63 \text{ cm}^3$ d'eau par cm^3 de sol ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). En ce qui a trait à la courbe de désorption en eau du sol pour les parcelles TÉMOIN (ligne pointillée), la teneur en eau du sol à la saturation est de $0,56 \text{ cm}^3$ d'eau par cm^3 de sol ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Suite à la saturation du sol, l'eau située dans les

macropores n'est pas retenue par le sol et sera perdue en profondeur par lessivage. Le volume d'eau retenu par les micropores du sol et par les forces d'adhésion des particules de sol correspond alors à la capacité au champ (CC). Cette valeur est d'environ 2 kPa ou près de $0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pour le TÉMOIN. Cette valeur a été déterminée *in situ* avec les tensiomètres 24 à 36 heures suivant une bonne pluie. Passé les 33 kPa de tension, la courbe se stabilise à une valeur moyenne de teneur en eau de $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Cependant, ce $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ n'est pas facilement accessible aux plants étant donné sa forte adsorption par le sol. Effectivement, la variation de la teneur en eau est très faible passé 33 kPa, et ce, malgré une hausse notable de la tension. La valeur de teneur en eau ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) renseigne sur le volume d'eau contenu dans le sol, alors que la tension (kPa) indique la disponibilité de cette eau. En d'autres termes, la force que la plante devra exercer pour aller chercher l'eau dans le sol. Pour avoir un portrait plus juste de l'eau disponible aux plants, il faut retrancher à la valeur de teneur en eau à la CC ($0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) celle observée à l'atteinte du plateau ($0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). La valeur obtenue indique le volume de sol agissant comme un réservoir d'eau facilement disponible à la plante, ce qui laisse environ $0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. À titre informatif, la valeur de la teneur en eau à 1500 kPa, soit le point de flétrissement permanent, est de $0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Maintenant, en ce qui a trait aux quatre autres courbes de désorption, il est difficile d'attribuer un « changement » à la capacité de rétention en eau du sol qui pourrait être attribuable à l'ajout d'AO. En effet, les courbes présentées à la figure 20 sont comparables, peu importe l'ajout ou non d'AO.

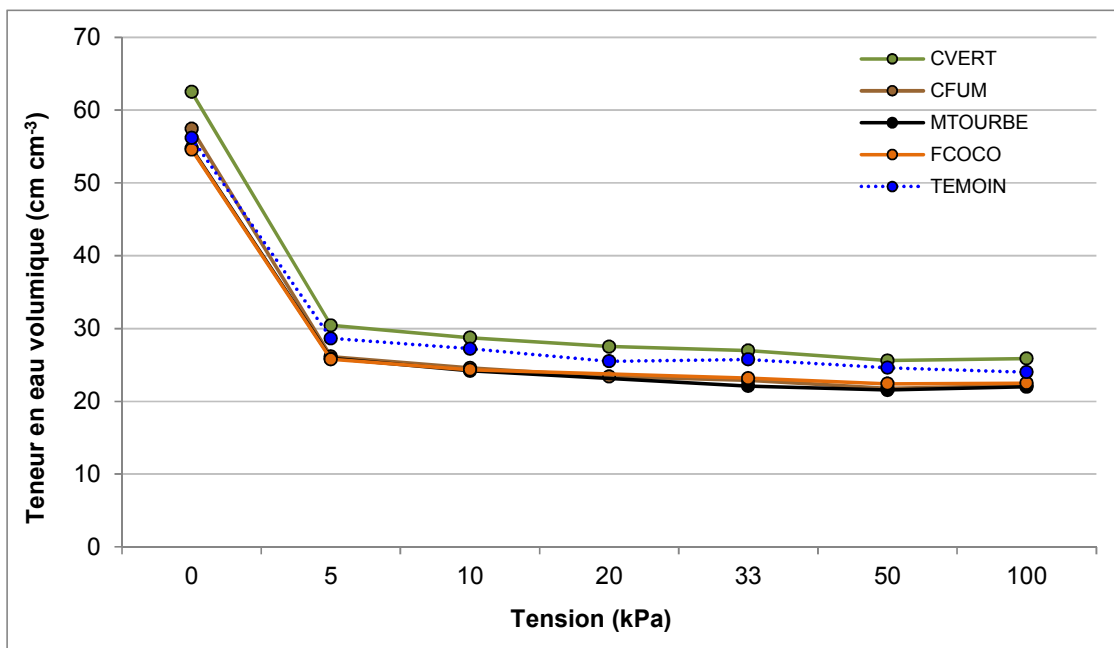


Figure 25. Courbes de désorption en eau du sol à l'automne 2012 selon l'apport ou non d'AO à l'implantation d'automne 2010 (0 à 100 kPa).

Par contre, l'apport d'AO a fait augmenter le taux de matière organique du sol. Effectivement, le taux de MO est de 3,36 pour le sol TÉMOIN, alors qu'il se situe entre 5,30 et 6,77 dans les autres traitements (Tableau 9). Puisque la MO a la capacité d'absorber l'eau, il se pourrait que cette augmentation du taux de MO par rapport au sol TÉMOIN ait eu un impact sur la capacité du sol à retenir l'eau. Pour le vérifier, le taux de MO pour chacune des 15 parcelles a

été mis en relation avec la valeur de la teneur en eau volumique du sol mesurée dans les parcelles correspondantes, et ce, pour différentes tensions (kPa) (Figure 26). Ces relations font intervenir le coefficient de régression R^2 , qui peut être exprimé en pourcentage¹, dont la résultante permet de mesurer l'ordre de grandeur de la relation entre deux variables. Plus ce coefficient est élevé, plus la variation d'un facteur explique la variation du second facteur. Les résultats obtenus (valeur de R^2 très faible) ne permettent toutefois pas de relier l'augmentation du taux de MO dans le sol à une meilleure capacité de rétention en eau des sols amendés. Le R^2 des relations avec les autres valeurs de teneur en eau volumique selon la tension considérée (0, 10, 33, 50 et 1500 kPa) est présenté au Tableau 9. L'apport d'AO a aussi eu moins d'impact qu'anticipé sur la densité apparente du sol. En effet, seule la densité apparente moyenne du sol amendé en CVERT a diminué par rapport au sol TÉMOIN, la valeur des autres traitements ne diffère pas de celle du TÉMOIN (Tableau 11).

Tableau 9. Taux de matière organique moyen mesuré dans les parcelles selon le traitement.

Traitements	Matière organique (%)
CVERT	6,04
CFUM	6,77
MTOURBE	5,30
FCOCO	4,64
TÉMOIN	3,36

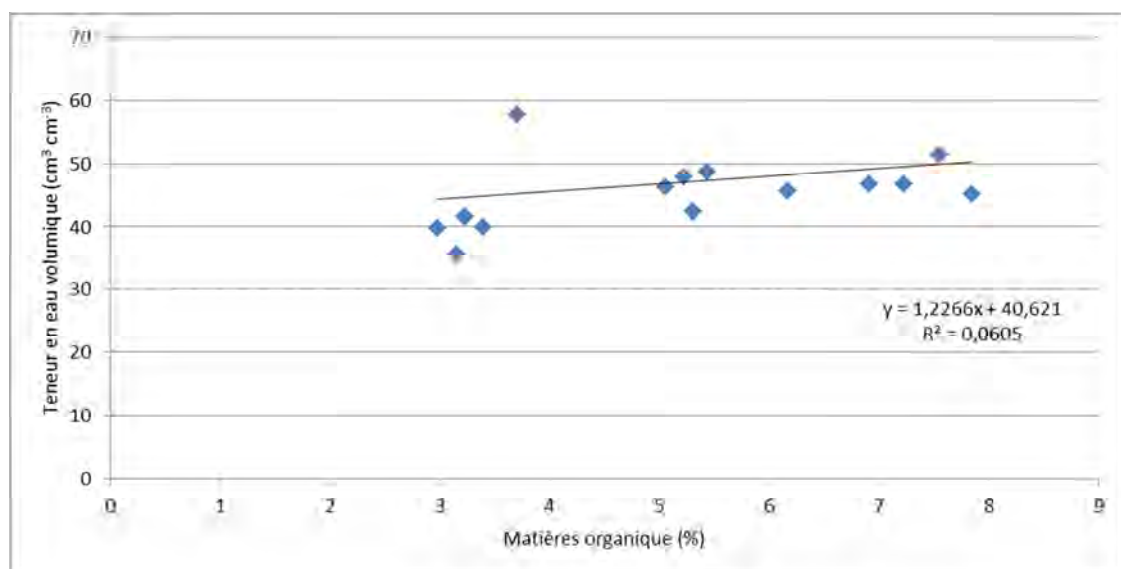


Figure 26. Corrélation entre le taux de matière organique du sol de chacune des 15 parcelles et la teneur en eau volumique du sol à la saturation.

¹ Il faut extraire la racine carrée du coefficient R^2 pour obtenir la correspondance en pourcentage. Par exemple, un R^2 de 0,0605 équivaut à 24,6 %.

Tableau 10. Coefficients de régression (R^2) résultant de la relation entre le taux de MO et la valeur de teneur en eau pour une tension donnée (kPa) pour une parcelle donnée.

Tension comparée avec le taux de MO (kPa)	Coefficient de régression (R^2)
0	0,0673
5	0,0393
10	0,0411
33	0,0201
50	0,0200
1500	0,0124

Tableau 11. Densité apparente moyenne du sol (g cm^{-3}) selon le traitement.

Traitements	Densité apparente moyenne du sol (g cm^{-3})
CVERT	1,12
CFUM	1,24
MTOURBE	1,26
FCOCO	1,26
TÉMOIN	1,28

La moyenne des tensions mesurées en 2012 pour chacun des traitements est présentée au

Tableau 12. Les valeurs sont présentées selon des périodes précises dans la saison. La période 1 (12 au 31 mai) est représentative d'une période où la demande en eau par le plant était plutôt faible. À la période 2, quoique les plants aient été plus développés qu'à la période précédente, les valeurs moyennes de tension indiquent une situation comparable à la première en termes de disponibilité de l'eau. Les périodes 3 et 4 (24 mai et 5 juin) représentent le statut hydrique du sol 24-36 heures après une pluie (près 30 et 40 mm), donc à la CC. Enfin, la période 5 (7 juillet) est représentative des tensions observées juste avant un épisode d'irrigation. Ces valeurs de tension (kPa) ont été mises en relation avec le taux de MO mesuré dans chacune des parcelles selon la période. Comme pour les résultats observés avec la teneur en eau, les faibles valeurs de R^2 (de 0,0031 à 0,0582) obtenues indiquent que le taux de MO ne peut pas être mis en relation avec les tensions observées.

Tableau 12. Valeurs moyennes de tension de l'eau dans le sol mesurées selon le traitement pour certaines périodes durant la saison 2012.

Traitements	Période 1 12 au 31 mai	Période 2 1 au 21 juin	Période 3 24 mai	Période 4 5 juin	Période 5 7 juillet
CVERT	1,4	6,4	1,3	1,3	55,5
CFUM	1,9	4,6	1,7	1,4	70,9
MTOURB	1,8	4,0	1,7	1,3	49,5
FCOCO	1,9	5,1	1,8	2,1	30,4
TEMOIN	1,5	5,1	0,9	1,2	59,4

Les variations de teneur en eau volumique mesurées avec les courbes de désorption dans les 15 parcelles semblent davantage reliées à la proportion (pondérale) de particules au diamètre supérieur à 2 mm (pierrosité) qu'aux différents apports en AO. À la Figure 27, la gravimétrie (%) mesurée dans les 15 parcelles a été mise en relation avec la teneur en eau volumique du sol à une tension de 5 kPa. Cette relation, très forte, indique que plus la gravimétrie est importante dans le sol, plus la teneur en eau volumique de ce sol à une tension donnée sera faible. Cette force de relation (R^2) se vérifie également avec les autres points de tension considérés au

Tableau 13.

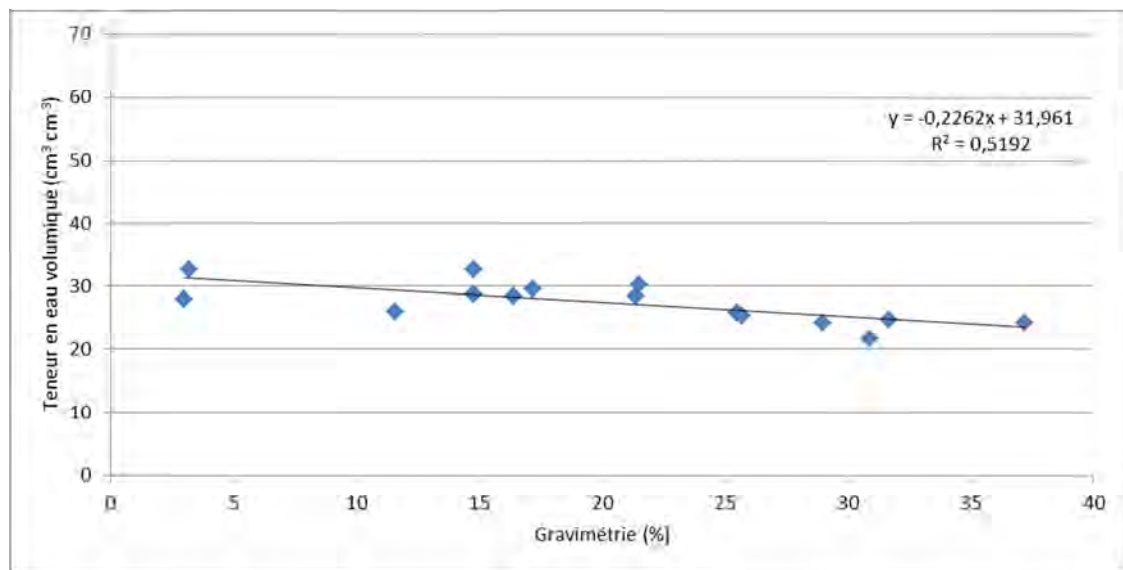


Figure 27. Corrélation entre la proportion de gravimétrie du sol mesurée dans les 15 parcelles et la teneur en eau volumique du sol à 5 kPa.

Tableau 13. Coefficients de régression (R^2) résultant de la relation entre la gravimétrie du sol et la valeur de teneur en eau du sol pour une tension donnée (kPa) pour une parcelle donnée.

Tension (kPa)	R^2
0	0,1886
5	0,5192
10	0,546
33	0,5315
50	0,5043
1500	0,1862

Tel qu'observé pour la teneur en eau volumique, la tension de l'eau dans le sol mesurée avec les tensiomètres semble également reliée à la gravimétrie. À la Figure 28, la gravimétrie (%) mesurée dans les 15 parcelles a été mise en relation avec la tension mesurée dans chacune des parcelles à la période 4, soit lorsque le sol était à la capacité au champ (CC). Cette relation, relativement forte indique que plus la gravimétrie est importante, plus la tension de l'eau dans le

sol sera élevée à la CC. Cette force de relation (R^2) se vérifie également avec les autres périodes, hormis celles où de fortes tensions sont mesurées (

Tableau 14).

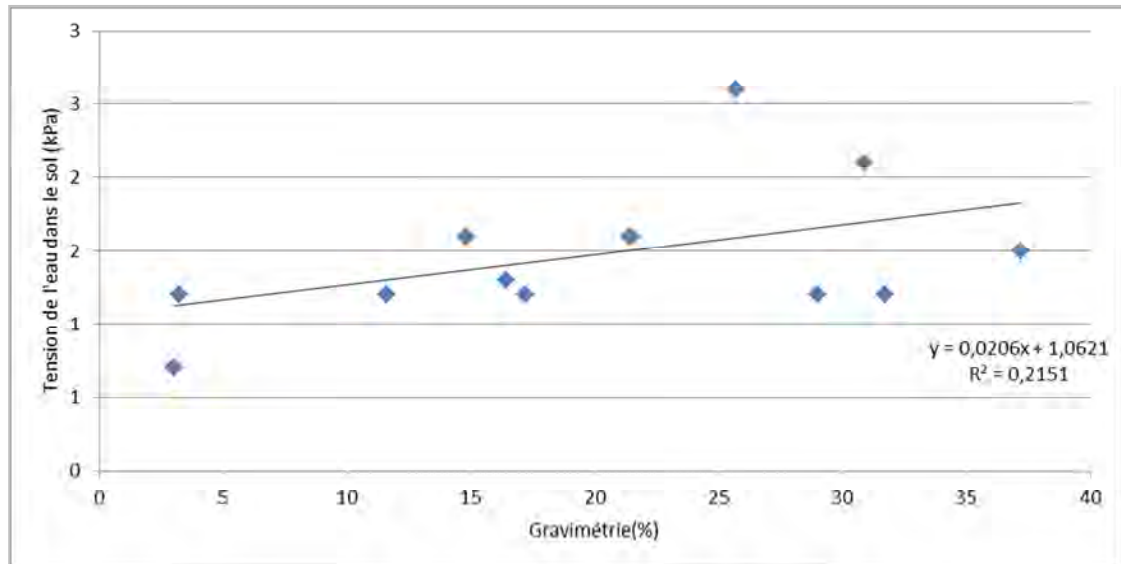


Figure 28. Corrélation entre la proportion de gravimétrie du sol mesurée dans les 15 parcelles et la tension de l'eau dans le sol mesurée à la CC (Période 4, 4 juin).

Tableau 14. Coefficients de régression (R^2) résultant de la relation entre la gravimétrie du sol et la tension de l'eau dans le sol pour une période donnée et pour une parcelle donnée.

Périodes	R^2
1 (faible demande)	0,156
2 (faible demande)	0,350
3 (CC)	0,270
4 (CC)	0,215
5 (fortes tensions)	0,021

Ainsi, l'apport d'AO au sol a été mesuré sur le taux de MO du sol. Toutefois, cette augmentation du taux de MO n'a pas eu d'impact mesuré sur la capacité de rétention en eau du sol et sur la disponibilité de cette eau à la plante. La gravimétrie mesurée dans le sol semble être un facteur qui peut expliquer la variation observée entre les parcelles, indifféremment des traitements, en ce qui a trait à la capacité de rétention en eau du sol et à sa disponibilité. En effet, plus la gravimétrie est élevée pour un même volume de sol, plus la capacité de rétention en eau est affectée à la baisse. Comme la pierrosité qui compose cette gravimétrie a une capacité de rétention en eau insignifiante par rapport au sol, plus il y a de pierres, plus la capacité de rétention en eau sera diminuée. La proportion de la gravimétrie étant importante, l'ajout d'AO a été insuffisant pour compenser cet effet.

3.6 Aspects économiques

Dans la culture d'arbres fruitiers, l'analyse coûts-bénéfices utilisant les rendements en fruits serait l'approche la plus appropriée. Toutefois, puisque l'étude porte sur l'implantation, il n'y a pas de données de rendement en fruits. Alternativement, il a tout de même été possible de calculer certains indicateurs économiques qui procurent une perspective sur les traitements mis à l'essai. En premier lieu, les coûts des AO et de l'engrais minéral sont rapportés sur la base d'un hectare en production et en fonction de la croissance nette des arbres. De plus, il a été possible d'évaluer l'enrichissement en P et K du sol apporté par les traitements et de le mettre en relation avec leurs coûts initiaux. Les coûts de chacun des traitements, incluant le coût des AO, des fertilisants minéraux et des opérations culturales, sont rapportés au Tableau 15 et aux Figure 29 et Figure 30. Les coûts des AO et de l'engrais sont ceux payés par le producteur lors du projet et sont valables pour des substrats neufs. Par contre, les coûts des opérations culturales, évalués à 8,00 \$ ha⁻¹ tant pour les AO que pour les fertilisants minéraux, proviennent des données économiques du CRAAQ (2012a). Ainsi, pour les traitements où les deux apports étaient prévus, le coût d'épandage total est de 16,00 \$ ha⁻¹, ce qui reste relativement petit par rapport au coût total par traitement.

Tableau 15. Coûts des amendements et des fertilisants dans la culture du cassisier, incluant les des opérations culturales.

Traitements	Coût total d'amendement et de fertilisation (\$ ha ⁻¹)	Croissance médiane (cm)	Coût ha ⁻¹ cm ⁻¹ croissance (\$ ha ⁻¹)
CVERT	2 582	46	56
CFUM	2 098	40	52
MTOURBE	3 841	40	96
FCOCO	6 538	38	172
TÉMOIN	680	45	15

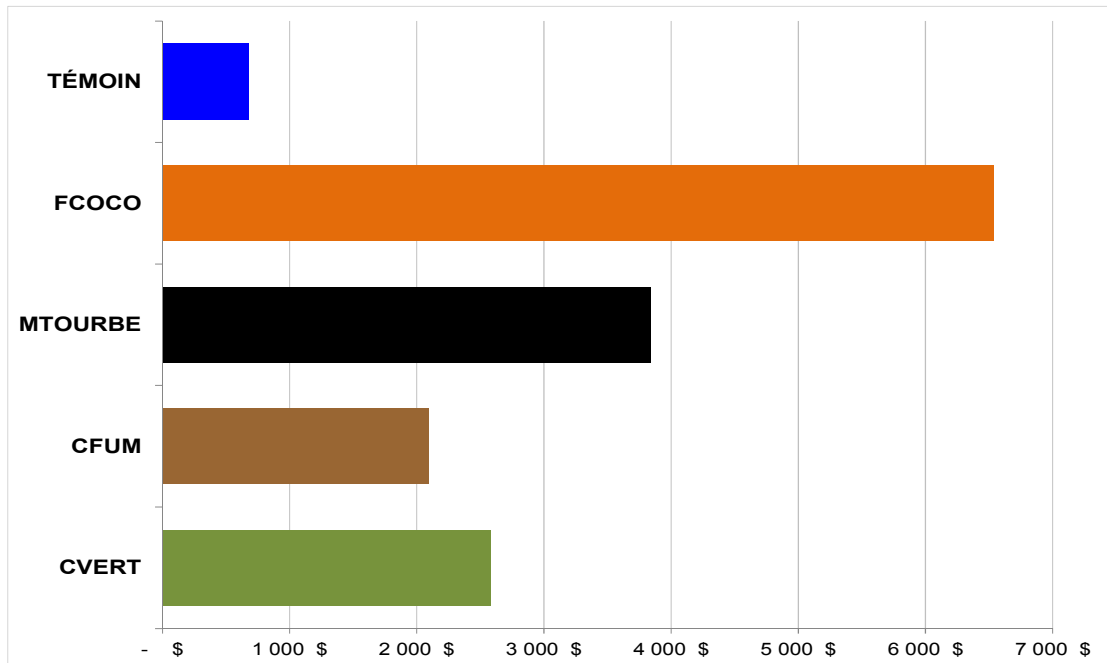


Figure 29. Coûts des amendements et fertilisants dans la culture du cassissier, incluant les frais d'opérations culturales (\$ ha⁻¹).

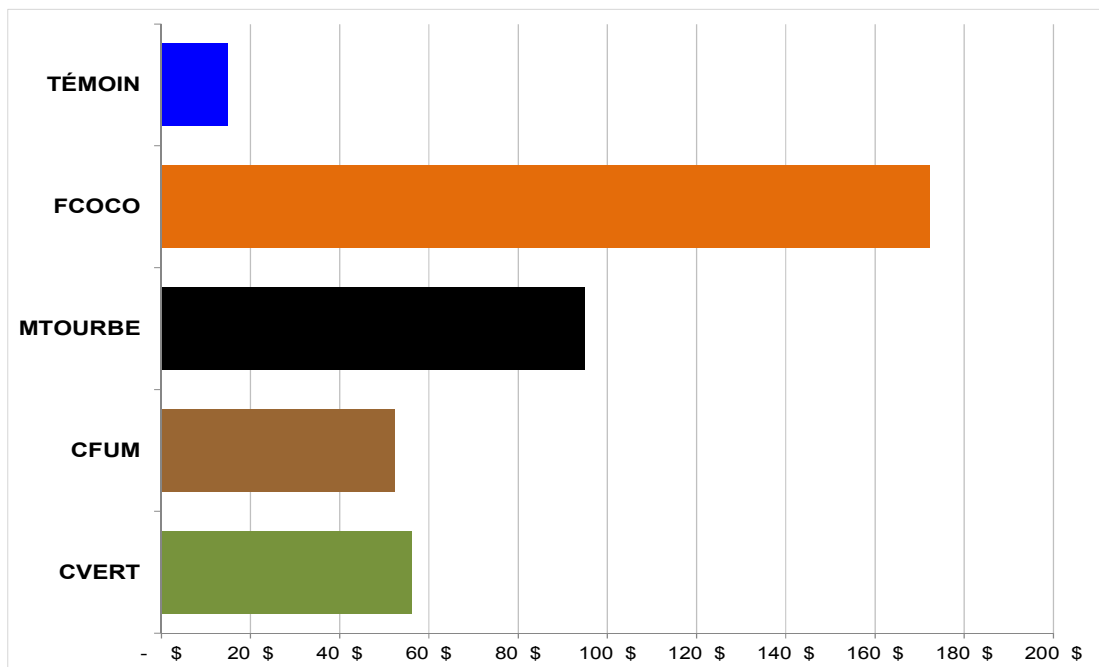


Figure 30. Coûts des amendements et fertilisants dans la culture du cassissier, incluant les frais d'opérations culturales (\$ ha⁻¹ cm⁻¹ de croissance nette).

L'analyse des coûts montre d'abord que la fertilisation seule est évidemment moins coûteuse que lorsqu'elle est accompagnée d'un AO. En fait, la fertilisation minérale à elle seule coûte 680 \$ ha⁻¹, alors que ce coût varie de 2 098 \$ ha⁻¹ à 6 538 \$ ha⁻¹ lorsqu'un amendement organique est apporté. L'écart est sensiblement le même lorsque les coûts sont rapportés sur la base de la croissance des arbres, alors que la fertilisation minérale seule se chiffre à 15 \$ ha⁻¹ cm⁻¹ comparativement à des coûts allant de 52 \$ ha⁻¹ cm⁻¹ à 172 \$ ha⁻¹ cm⁻¹ en considérant les différents AO. Évidemment, le ratio des coûts entre la croissance nette et le coût des intrants à l'implantation diminuera avec le temps puisque le coût initial ne changera pas, mais que les plants prendront de la hauteur. D'ailleurs, en souhaitant comparer entre eux les traitements avec amendement, il ressort que ceux avec le CFUM et le CVERT se démarquent notablement. Ces deux AO ont permis, en 2012, une croissance des arbres environ deux fois moins cher que celle attribuable à la MTOURBE (≈ 50 \$ ha⁻¹ vs 100 \$ ha⁻¹) et moins du tiers du coût de la FCOCO (≈ 55 \$ ha⁻¹ vs 170 \$ ha⁻¹). Cela dit, chacun des traitements a procuré au sol un enrichissement en P et en K qui bénéficiera à la culture dans les années subséquentes à son implantation. Cet enrichissement a été évalué sur la base des prix de 2012 des engrais phosphatés (0-46-0) et potassiques (0-0-60) (CRAAQ, 2012b). Il a donc été possible d'attribuer une valeur à ces enrichissements pour chacun des traitements. Cette valeur est exprimée par le rapport entre la valeur de l'enrichissement de fertilité (P et K) et le coût initial d'amendement et de fertilisation aux

Tableau 16 et Tableau 17 ainsi qu'à la Figure 31. L'avantage marqué de la fertilisation seule, comparativement aux traitements avec AO, y ressort à nouveau. Le ratio de la valeur de l'enrichissement de fertilité sur le coût des AO et fertilisants montre que la fertilisation minérale seule procure un avantage économique notable. Parmi les AO, il faut toutefois noter que le ratio de la valeur de la fertilité sur le coût de la fertilisation est nettement meilleur pour le CVERT que pour tous les autres AO. Par contre, à long terme, l'apport de MO pourrait procurer un avantage qui n'a pas eu le temps de se générer sur seulement deux saisons, tel un relâchement d'éléments fertilisants plus soutenu ou le maintien d'une meilleure structure de sol à moyen et long terme.

Tableau 16. Valeur d'enrichissement en P et K selon les traitements.

Traitements	Enrichissement en P (kg ha ⁻¹)	Valeur d'enrichissement en P (\$ ha ⁻¹)	Enrichissement en K (kg ha ⁻¹)	Valeur d'enrichissement total (P + K) (\$ ha ⁻¹)
CVERT	89	178	183,42	258,31
CFUM	56	113	-43,62	-61,43
MTOURBE	88	177	54,05	76,12
FCOCO	48	96	89,25	125,69
TÉMOIN	39	78	61,15	86,12

Tableau 17. Valeur d'enrichissement fertilisante / coût de la fertilisation.

Traitements	Valeur d'enrichissement total (P + K) (\$ ha ⁻¹)	Coût des amendements et des fertilisants (\$ ha ⁻¹)	Ratio valeur / coût
CVERT	436	2 566	0,17
CFUM	52	1 958	0,02
MTOURBE	253	3 153	0,07
FCOCO	221	5 851	0,03

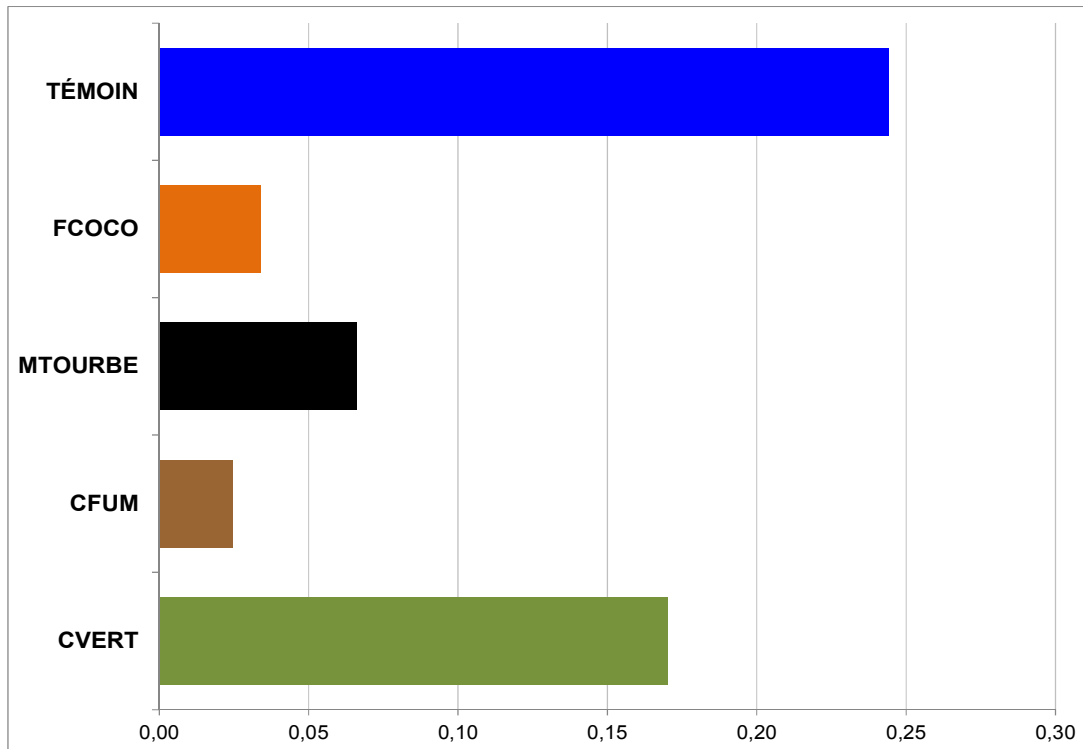


Figure 31. Ratio des valeurs des éléments fertilisants/Coûts d'amendement et des fertilisants.

Ainsi, sur la base des résultats économiques générés dans ce projet, il y a peu de chance que les AO procurent une marge bénéficiaire supérieure à un producteur d'arbres fruitiers, comparativement aux pratiques courantes, sur le court terme. Les essais contenant seulement les apports de fertilisation minérale annuels, sans AO, ont offert des résultats économiques supérieurs en général. Cela dit, si un arboriculteur devait se concentrer sur un apport d'AO, le CVERT et le CFUM seraient probablement les meilleurs choix. Parmi les AO, ces deux matières offrent les meilleures performances au chapitre des coûts par unité de superficie. Il en est de même pour les coûts par unité de croissance ($\$ \text{cm}^{-1}$). Toutefois, la meilleure analyse possible aurait été l'analyse coûts-bénéfices. Elle nous aurait permis de mieux comparer les coûts survenant en début de période avec les bénéfices futurs.

4 CONCLUSION

Ce projet a fait ressortir l'importance de bien choisir le type d'AO appliqué à l'implantation d'un verger de cassis. En effet, selon le type d'AO choisi, les impacts sur la fertilité des sols, la croissance des plants, les coûts et le risque de perte de N dans l'environnement ont été forts différents. Globalement, l'emploi d'AO n'a pas produit une meilleure croissance des plants que l'engrais minéral. Toutefois, l'application d'AO s'est démarquée sur plusieurs autres aspects, principalement pour le CVERT. Entre autre, le statut nutritionnel des plants de tous les traitements a été identique, même dans les parcelles CVERT et CFUM où la quasi-totalité du P et une grande partie du K étaient apportées par les AO. Par ailleurs, l'application de CVERT a permis d'atteindre la meilleure croissance, à égalité avec l'engrais minéral, tout en permettant une hausse du pH du sol, ainsi que de ses contenus en P et K disponibles. De tels enrichissements confirment l'importance de fertiliser le sol en bande à l'implantation et de ne pas considérer l'apport d'AO simplement comme un ajout de MO structurante, mais également comme un apport d'éléments nutritifs à court et plus long terme. D'autant plus que les sols amendés en CVERT étaient aussi ceux qui avaient le plus haut contenu en nitrate résiduel à l'automne, à risque d'être lessivé, renforçant la nécessité de tenir compte de l'apport en N des AO lors de leur utilisation. Les sols amendés en CVERT et le sol TÉMOIN ont d'ailleurs présenté un potentiel de fourniture en nitrate à la culture similaire lors des incubations de sol, trois fois plus grand que celui des sols amendés en CFUM et MTOURBE. Les sols amendés avec de la FCOCO n'ont, quant à eux, relâché aucun nitrate, ce qui pourrait indiquer qu'ils ont été immobilisant pour l'azote. La FCOCO a aussi abaissé significativement le pH du sol. Par ailleurs, seul le CVERT a fait diminuer davantage la densité apparente du sol, comparativement au témoin. Toutefois, suivant le travail du sol, tous les sols présentaient une densité apparente moindre que celle du sol d'origine, plutôt élevée. Par contre, puisque les sillons n'avaient que huit pouces de profondeur, les racines des plants pourraient rapidement atteindre le sol compacté sous la bande, réduisant les bénéfices pouvant être retirés des AO. Ainsi, la compaction ressort comme un facteur très probable de limitation de la productivité des plants de ce champ. Les AO ont également tous permis de hausser le taux de MO du sol, comparativement au sol TÉMOIN. Cependant, cela n'a eu aucun impact sur la capacité de rétention en eau du sol et sur la disponibilité de cette eau à la plante. C'est en fait la gravimétrie du sol, non affectée par l'apport d'AO, qui a été le plus reliée à ce paramètre. Au niveau économique, l'emploi de l'engrais minéral s'est avéré de loin le moins coûteux. De plus, il a présenté le plus faible coût par cm de croissance des plants à l'hectare. Toutefois, si l'enrichissement en P et K disponibles est considéré, le CVERT devient un choix intéressant puisqu'il présente, avec le TÉMOIN, un des meilleurs ratios « valeurs des éléments fertilisants / coûts ». De plus, à long terme, l'apport d'AO pourrait procurer des avantages qui n'ont pas eu le temps de se générer sur seulement deux saisons, tel un relâchement d'éléments fertilisants plus soutenu ou le maintien d'une meilleure structure de sol à moyen et long terme. Au final, c'est la fibre de coco qui présente la moins bonne option économique et agronomique. Toutefois, dans cette étude, de la fibre de coco neuve, au coût plus élevé que de la fibre usagée, a dû être utilisée à cause des risques potentiels de maladies associés à l'utilisation de fibres usagées.

5 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'entreprise Cassis Monna & Filles pour leur précieuse collaboration au projet, ainsi que tous les étudiants d'été qui ont participé au projet. Merci également à Mme Michèle Grenier de l'IRDA pour l'analyse statistique des données. Nous soulignons également la collaboration du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, direction Capitale-Nationale (MAPAQ-DRCN). Finalement, nous désirons souligner que ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme d'appui à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

6 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUDETTE, M. et M.J. LAREAU. 1997. Guide de culture des cassissiers, groseilliers et gadeliers, CPVQ. AGDEX 236/20, Québec, 44 pages.

CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (CRAAQ). 2010. Guide de référence en fertilisation 2^{ème} édition. 473 pages.

CRAAQ. 2012a. Machinerie - Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés. AGDEX 740/825 (Mars 2012). 25 pages.

CRAAQ. 2012b. Fertilisants et amendements – Prix. AGDEX 540/855 (Juin 2012). 1 page.

CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC (CPVQ). 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Agdex 533, Méthode SS-1.

FILÈRE DES PLANTS MÉDICINALES DU QUÉBEC (FPMBQ). 2010. Le Cassis, Guide de production sous régie biologique. Édition 2009. 32 pages.

GEE, G.W. et J.W. BAUDER. 1986. Particle-size analysis. *Dans* A. Klute (ed) Methods of soil analysis. Part 1. ASA. Monograph No 9. 2nd édition. Madison, WI. pages 383-411.

ISAAC, R.A. et W.C. JOHNSON. 1976. Determination of total nitrogen in plant tissues using a block digester. J. Ass. Off. Anal. Chem. 69 : Pages 98-101.

KANDELER, E. et H. GERBER. 1988. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Boil. Fertil. Soils* 6: Pages 68-72.

LITTELL, R.C., G.A. MILLIKEN, W.W. STROUP, R.D. WOLFINGER et O. SCHABENGERGER. 2006. SAS. System for Mixed Models, second edition. Cary, NC : SAS Institute inc.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ALIMENTATION ET DES AFFAIRES RURALES DE L'ONTARIO (MAAARO). 2013. Recommandations pour les cultures fruitières. Chapitre 6 : petits fruits. Publication 360F, Ontario. [En ligne]
<http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub360/5nutrit.pdf> (consulté en 2013).

NISKANEN R. 2002. Nutritional status in commercial current fields. *Agricultural and Food Science in Finland*, vol 11: Pages 301-310.

TOPP, G.C., Y.T. GALGANOV, B.C. BALL et M.R. CARTER. 1993. Soil water desorption curves. *Dans* M.R. Carter (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida. Pages. 569-580.

TRAN, T.S. et R.R. SIMARD. 1993. Mehlich III-extractable elements. Chapitre 6. *Dans* M.R. Carter (ed.) Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Florida. Pages 43-49.