Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

Rapport final – IA 119037

Impacts de la température et du type de fertilisant organique sur la fourniture en azote du sol et la productivité des cannebergières en régie biologique.

1 février 2025

Responsable scientifique : Christine Landry, Ph. D., biologiste, agronome, IRDA

Ce rapport a été produit à l'attention de : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).

À l'IRDA, on collabore, on se questionne, on explore et on progresse ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des scientifiques, mais aussi des gens de terrain qui collaborent avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Christine Landry, Ph. D., biologiste, agronome, IRDA
Chercheure en fertilisation et valorisation des biomasses
Responsable scientifique et autrice principale
T : 418 643-2380 p.640
christine.landry@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D., IRDA
Mylène Marchand-Roy, M. Sc., IRDA
Julie Mainguy, B. Sc., IRDA

Collaborateurs au contenu

Analyses statistiques et édition
Julie Forest-Drolet, M. Sc., IRDA

Collaborateurs au projet

Mylène Blier, Tornade Rouge
Pascale Vigneault, Tornade Rouge
Olivier Pilotte, Nature Canneberge
Cassandra Le Moine, Nature Canneberge
Jocelyne Moreau, Fruit d'Or
Sébastien Marchand, conseiller agricole
Didier Labarre, CETAQ
Jean-Pierre Deland, Ocean Spray

Merci à nos partenaires financiers

Ce projet de recherche a été financé par l'entremise du programme Innov'Action Agroalimentaire, un programme issu de l'Accord Canada-Québec de mise en œuvre du Partenariat canadien pour l'agriculture conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Ensemble, le Cranberry Institute et les entreprises de transformation Fruits d'Or, Ocean Spray et Citadelle, ainsi que les fournisseurs d'engrais organiques Acti-sol, Coop Vivaco et Organic Ocean ont participé significativement au financement de ce projet.

PARTENARIAT CANADIEN pour l'AGRICULTURE

Canada Québec

Ce rapport peut être cité comme suit :
Landry, C., Marchand-Roy, M. et Mainguy, J. 2025. Impacts de la température et du type de fertilisant organique sur la fourniture en azote du sol et la productivité des cannebergières en régie biologique. Rapport final IA-119037. 47 pages.
© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

Remerciements

Les auteurs remercient les producteurs de canneberges Tornade Rouge et Nature Canneberge pour leur implication dans le projet et pour avoir permis la réalisation des essais. Les remerciements s'adressent également au Cranberry Institute, aux entreprises de transformation Fruits d'Or, Ocean Spray et Citadelle et aux fournisseurs d'engrais organiques Acti-Sol, Organic Ocean et Coop Vivaco, pour leur contribution en temps et en argent et pour avoir fourni les intrants organiques. Les remerciements s'étendent à Jacques Painchaud, anciennement agronome au MAPAQ et impliqué dans l'idéation du projet, ainsi qu'à Sébastien Marchand, consultant expert en production de canneberges et au Club Environnemental et Technique Atocas Québec (CETAQ), pour leur expertise et leur contribution à la récolte des fruits et à l'évaluation de la qualité des récoltes. Enfin, les remerciements s'adressent au personnel du Laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA et aux étudiants d'été 2021-2022 ayant participé aux diverses tâches terrain et à Gaétan Daigle, statisticien à l'Université Laval, pour son soutien aux analyses.

TABLE DES MATIÈRES

1 Description du projet 1
1.1 Mise en contexte 1
1.2 Objectifs 2
2 Matériel et méthode 3
2.1 Volet 1 – Cinétique de minéralistion des engrais organiques en conditions contrôlées 3
2.1.1 Échantillonnage des sols et caractérisation physicochimique 3
2.1.2 Caractérisation des engrais organiques 3
2.1.3 Dispositifs et traitements 4
2.1.4 Détermination de la capacité au champ des sols 8
2.1.5 Analyses statistiques 8
2.2 Volet 2 – essais des engrais organiques au champ 8
2.2.1 Choix du site 8
2.2.2 Dispositif et traitements 9
2.2.3 Analyses statistiques 10
2.3 Collecte de données 11
2.3.1 Analyses physiques, chimiques et biologiques du sol et des engrais 11
2.3.2 Suivi in situ des membranes d'échanges ioniques (MEI) 12
2.3.3 Développement, nutrition et rendements des plants 14
2.3.4 Arrière-effet des régies de fertilisation sur les rendements de l'année suivante 15
2.3.5 Suivi de la température du sol et des données météorologiques et d'irrigation 16
2.4 Analyse économique 16
3 Résultats et discussion 17
3.1 Volet 1 – Cinétique de minéralisation des engrais organiques en conditions contrôlées 17
3.2 Volet 2 – Essais des engrais organiques au champ 22
3.2.1 Conditions météorologiques saisonnières 22
3.2.2 Indicateurs de rendement 24
3.2.3 Nutrition 33
3.2.4 Dynamique et contenu en N minéral du sol (0-10 cm) en fonction des régies de fertilisation 35
3.2.5 Indicateurs d'activité biologique du sol 37
3.3 Analyse de rentabilité de la fertilisation azotée 39
4 Conclusion 43
5 Références 44
Annexe 1 47

Liste des tableaux

Tableau 1. Paramètres d'incubations des engrais Actisol, Vivaco et Trident de 2019. 5
Tableau 2. Paramètres d'incubations de l'engrais Luzerne de 2021. 5
Tableau 3. Calendrier des opérations principales du Volet 1 - incubation 8
Tableau 4. Caractéristiques physicochimiques du sol au site d'étude au printemps avant tout apport d'engrais. 9
Tableau 5. Répartition des apports en N dans la saison en fonction des différentes régies de fertilisation. 10
Tableau 6. Calendrier des principales opérations culturales et d'échantillonnages des essais, saisons 2021 et 2022. 11
Tableau 7. Résumé des paramètres d'analyses du sol et des temps d'échantillonnage dans le dispositif pendant une saison de croissance. 12
Tableau 8. Périodes de changement des membranes d'échange ioniques (MEI) pendant les saisons 2021 et 2022. 13
Tableau 9. Caractéristiques physicochimiques des sols incubés en conditions contrôlées. 17
Tableau 10. Caractérisation physicochimique des engrais organiques incubés en conditions contrôlées, sur base tel que reçu. 18
Tableau 11. Paramètres de production de N_{min} des divers engrais organiques incubés selon le type de sol et la température. 20
Tableau 12. Proportion de N_{min} fournie par les divers EO incubés sur la quantité initiale de N_{tot} appliqué selon le type de sol et la température. 21
Tableau 13. Intervalle de teneur en azote foliaire des plants de canneberge selon différentes sources publiées[1] 33
Tableau 14. Exportation d'azote selon les régies de fertilisation basée sur la teneur en N des fruits et le rendement total. 34
Tableau 15. Prix des engrais organiques utilisés dans les différentes régies de fertilisation azotée. 41
Tableau 16. Coûts ($ ac^{-1}) des différentes régies de fertilisation azotée basés sur les intrants et les passages de machinerie. 41
Tableau 17. Prix de vente de la canneberge biologique 2021-2024 41
Tableau 18. Revenus moyens (2021-2022) pour un acre de canneberges biologiques obtenues dans le cadre de l'étude. 42

Liste des figures

Figure 1. Zone de prélèvement de sol de 1 m^2 sur 10 cm d'épaisseur (strate 0-10 cm), printemps 2019. 3
Figure 2. Schéma du plan d'expérience (dispositif) dans l'incubateur maintenu à 23 °C en 2019. 6
Figure 3. Schéma du plan d'expérience (dispositif) dans l'incubateur maintenu à 14 °C en 2019. 7
Figure 4. Site d'essai, cannebergière en 16e année de production, 31 mai 2022. 9
Figure 5. Insertion d'une membrane d'échange ionique au champ. 13
Figure 6. Schéma d'une parcelle et des zones d'échantillonnage et de prise de mesures 15
Figure 7. Prélèvement des rendements en fruits, quadrats de 6 po x 6 po, 4 octobre 2021. 15
Figure 8. Granules de luzernes non décomposés retrouvés au champ lors des essais au moment de la récolte. 20
Figure 9. Minéralisation du N_{org} en N minéral ($N\text{-}NH_4$ + $N\text{-}NO_3$) des divers engrais organiques pendant 112 jours en fonction du type de sol de cannebergière (jeune ou mature) et de la température d'incubation (14 ou 23 °C). 21
Figure 10. Température de l'air au niveau de la canopée des plants de canneberge et température du sol à 1 cm et 10 cm de profondeur, pendant les saisons de croissance 2021 et 2022. 23
Figure 11. Tension du sol et apport d'eau par les précipitations et l'irrigation par gicleur, pendant les saisons de croissance 2021 et 2022. 23
Figure 12. Potentiel de rendement de printemps des parcelles à l'étude avant fertilisation, 2021 (8 juin) et 2022 (17 juin). 24
Figure 13. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le taux de nouaison en fin de saison selon les régies de fertilisation, années 2021 et 2022 combinées. 25
Figure 14. Taux de nouaison en fin de saison selon la dose d'apport d'azote et le type de fertilisant, années 2021 et 2022 combinées. 25
Figure 15. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le rendement total selon les régies de fertilisation, années 2021 et 2022 combinées. 26
Figure 16. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le rendement vendable selon les régies de fertilisation, années 2021 et 2022 combinées. 27
Figure 17. Rendement vendable selon la dose d'apport d'azote et le type de fertilisant, années 2021 et 2022 combinées. 27
Figure 18. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le potentiel de rendement atteint selon la régie de fertilisation, années 2021 et 2022 combinées. 27
Figure 19. Potentiel de rendement atteint selon la dose d'apport d'azote et le type de fertilisant, années 2021 et 2022 combinées. 28

Figure 20. Potentiel de rendement en fruits du dispositif de 2021 pour la saison 2022 selon la fertilisation du printemps 2021 (arrière-effet fertilisants et doses N 2021). 29
Figure 21. Rendement vendable de 2022 selon la régie de fertilisation de 2021. 29
Figure 22. Calibre des fruits (rendement total) selon le type de fertilisant, saison 2021. 30
Figure 23. Nombre de fruits produits selon le type de fertilisant et la dose d'apport de N, saison 2021. 30
Figure 24. Fermeté des fruits à la récolte (manuelle) selon la dose d'apport d'azote et le type de fertilisant, années 2021 et 2022 combinées. 31
Figure 25. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur l'acidité des fruits, années 2021 et 2022 combinées. 32
Figure 26. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le degré Brix des fruits, années 2021 et 2022 combinées. 32
Figure 27. Sucrosité (degré Brix) des fruits selon la dose d'apport d'azote et le type de fertilisant, années 2021 et 2022 combinées. 32
Figure 28. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le contenu en anthocyanes (TACY) des fruits, années 2021 et 2022 combinées. 33
Figure 29. Effet linéaire du type de fertilisant et de la dose d'apport d'azote sur la teneur foliaire en azote (tige annuelle + feuilles), années 2021 et 2022 combinées. 34
Figure 30. Flux de N-NH4 en fonction de la régie de fertilisation, pendant les saisons de croissance 2021 et 2022. Les moments des fractionnements des apports d'engrais (Fract.) sont indiqués dans les graphiques par une flèche bleue. 36
Figure 31. Somme saisonnière des flux d'ion ammonium selon les régies de fertilisation azotée, saisons 2021 et 2022 combinées. 37
Figure 32. Contenu en C labile (C_{eau}) du sol (0-10 cm) selon l'apport ou non d'engrais organique (dose de 50 kg N ha^{-1}) suivant les 2^{e} et le 3^{e} fractionnement d'engrais en saison, années 2021 et 2022 combinées. 38
Figure 33. Contenu en ammonium ($N\text{-}NH_{4\ eau}$) du sol (0-10 cm) selon l'apport ou non d'engrais organique (dose de 50 kg N ha^{-1}) suivant les 2^{e} et le 3^{e} fractionnement d'engrais en saison, années 2021 et 2022 combinées. 38
Figure 34. Contenu en C et N microbien du sol (0-10 cm) selon l'apport ou non d'engrais organique (dose de 50 kg N ha^{-1}) suivant le 3^{e} fractionnement d'engrais en saison, années 2021 et 2022 combinées. 39
Figure 35. Taux de respiration microbienne et d'activité uréase du sol (0-10 cm) selon l'apport ou non d'engrais organique (dose de 50 kg N ha^{-1}) suivant le 3^{e} fractionnement d'engrais en saison, années 2021 et 2022 combinées. 39
Figure 36. Coût des différentes régies de fertilisation N par tonne (t) de canneberge produite. 41
Figure 37. Écart entre la marge sur coût variables des différentes régies de fertilisation par rapport à la régie Témoin 0N. 42
Figure 38. Plan du dispositif expérimental en 2021 et 2022. 47

1 DESCRIPTION DU PROJET

1.1 MISE EN CONTEXTE

La culture de la canneberge est une activité agricole importante au Québec. La province qui compte 86 producteurs produisant 100 083 tonnes de fruits an^{-1} se place comme principale province productrice canadienne et occupe le 2e ou 3e rang mondial selon les années, précédée des états américains du Wisconsin et du Massachusetts (MAPAQ 2025). Sa culture et sa transformation contribuent au développement économique en générant 2 200 emplois directs et indirects à temps plein, des recettes en provenance du marché de 84,4 millions $ et des exportations de 195,7 millions $ (données de 2021). La recherche dans le secteur de la canneberge a été active au Québec ces dernières années, surtout en ce qui a trait à la régie de l'eau (Bonin 2009). Ces travaux ont contribué à la hausse marquée de 68 % des rendements en production conventionnelle (18 075 vs 30 423 lb ac^{-1}) et de 90 % en bio (12 076 vs 22 988 lb ac^{-1}) entre 2007 et 2016. Ces performances ont aussi propulsé les superficies en production, passant de 4 636 à 12 098 ac de 2007 à 2023 (APCQ 2024), surtout en production biologique (bio) où le Québec se démarque particulièrement (Rioux et coll. 2018). Alors que l'essor du bio a connu un sommet atteignant 38 % des superficies en 2020, classant la province comme leader mondial de la canneberge bio (Rioux et coll. 2018), on assiste désormais à un certain recul de la production alors que les superficies ne représentent plus que 17,5 % en 2024. La lutte aux ravageurs et l'accès limité aux fertilisants homologués biologiques demeurent parmi les principaux défis rencontrés (Morneau 2024). Pour demeurer compétitif, les efforts en R&D doivent toutefois continuer. Selon les « *Priorités de recherche et de transfert de connaissances en agriculture biologique - Québec 2017-2022* » du CRAAQ, il est prioritaire de réaliser des essais de fertilisation en régie bio, surtout pour diminuer l'écart de 24 % avec la production conventionnelle (30 335 vs 22 998 lb ac^{-1}) (Painchaud 2017) tout en maintenant la qualité des fruits. Ce mandat présente cependant des défis importants. D'une part, la fertilisation bio est complexe en soi de par la nature des engrais et le rôle joué par les microorganismes (MOG) du sol dans la mise en disponibilité du N. D'autre part, la canneberge présente ses défis spécifiques. Il s'agit d'une plante pérenne (famille des éricacées), qui préfère le NH_4 (Hart et coll. 2015). Elle recycle le 2/3 du N de la saison dans ses tissus (Davenport et coll. 1995; Davenport et coll. 2000). Ces réserves suffisent à soutenir sa croissance au printemps suivant jusqu'au stade floraison (fin-juin). Elle absorbe dans un délai maximal de 7 jours le N disponible apporté (Roper et Krueger 2004). De plus, son milieu de croissance est atypique, soit les sols très sableux et acides. Ces conditions ont un impact majeur sur la minéralisation du N organique (N_{org}) et l'équilibre des formes minérales de N, où le NH_4 prédomine. En effet, sous un pH de 5,5, le NO_3 n'est pas produit (Hart et coll. 2015). De même, l'activité de l'uréase, responsable de la minéralisation du N_{org} est affectée à la baisse par le pH (Singh et Nye 1984).

Le programme de fertilisation doit tenir compte de toutes ces particularités. La fertilisation débute au stade floraison et le N est apporté en trois ou quatre fractionnements entre la floraison et le grossissement des fruits. L'apport total joue entre 45 et 60 kg N_{eff} ha^{-1}, selon le statut foliaire de l'automne précédent (mi-août à mi-septembre) (CRAAQ 2010), alors que les niveaux de N sont stabilisés (Davenport et coll. 1995). La fertilisation sert donc à répondre aux besoins à court terme de la plante, à des moments précis, sans surfertiliser ni faire des apports trop tardifs car cela peut provoquer la pourriture des fruits (Deland et coll. 2017) et un développement végétatif trop important au détriment de l'aoûtement, ce qui nuit en retour à la production en fruits de l'année subséquente (Hart et coll. 2015). En régie conventionnelle, l'utilisation de N minéral (N_{min}) (21-0-0) permet facilement cette précision (quantité et « timing »). En production bio, la nécessité d'utiliser des engrais organiques (EO) dont le N_{org} doit être minéralisé rend la tâche beaucoup plus complexe, puisque cela occasionne des délais et de la variation dans la fourniture en N qui dépendent surtout de la nature des EO et de la température.

La nature des produits peut s'établir avec une caractérisation détaillée des nutriments et du carbone (C) et en calculant des ratios entre ces éléments. Pour la fertilisation azotée, il est important de connaître les contenus en C et N totaux et labiles (soluble à l'eau), minéraux et organiques. Les EO ayant un faible rapport C/N et composés de C plus facile à dégrader se minéraliseront plus vite. Les EO ayant un rapport N_{min}/N_{org} élevé auront une efficacité fertilisante plus grande. Ainsi, un EO de faible stabilité présentant un contenu plus élevé en N tendra à fournir plus de N. Une fois les produits caractérisés, cet aspect de la régie (choix de l'EO) présente l'avantage d'être constant, puisque la composition des produits commerciaux est très stable, contrairement à la température du sol, très variable selon la hâtiveté du printemps. Bien connaître les produits permet donc de sélectionner le bon EO pour le bon fractionnement, en fonction des conditions saisonnières de terrain.

La température du sol et la minéralisation du N_{org} sont en effet directement corrélées (Davenport 2004). Comme la production de N_{min} devient significative à partir de 23°C (Hart et coll. 2015), il ne faut pas une si grande diminution des températures par rapport à la normale pour abaisser significativement la production de N_{min}. Lors de printemps hâtifs, le sol se réchauffe rapidement (>20°C). Ainsi, la production de N_{min} augmente rapidement et lorsque la canopée se referme, elle crée un isolant qui conserve cette température tout au long de la saison. À l'inverse, lors de printemps tardifs, le sol n'a pas le temps de se réchauffer avant la fermeture de la canopée et le sol demeure frais toute la saison (autour de 15°C; Painchaud, communication personnelle). Il y a donc un risque élevé que le N des EO se libère trop peu et/ou trop tard par rapport aux besoins de la plante. Le délai peut même produire trop de N après la nouaison, ce qui nuira à l'aoûtement, à la fermeté des fruits et augmentera la sensibilité des tiges aux maladies fongiques. Ce phénomène a été observé en 2017, saison fraîche et humide, où les rendements bio ont été très inférieurs (12 262 kg ha^{-1} (10 920 lb ac^{-1})) en comparaison à la saison 2016, chaude et sèche, où un record de 25 819 kg ha^{-1} (22 966 lb ac^{-1}) a été produit (APCQ 2024). Mieux comprendre le délai de minéralisation du N des EO en fonction de la température devient donc crucial tant pour les producteurs bio que ceux désirant intégrer les EO à leur régie, afin d'être en mesure de s'ajuster d'une saison à l'autre, d'autant plus qu'avec les changements climatiques, les écarts de températures iront en augmentant. Cet ajustement pourrait être réalisé en utilisant divers EO en fonction de leur type de N et de leur vitesse de minéralisation.

1.2 OBJECTIFS

Permettre une gestion flexible de la fertilisation N (type et dose) selon la température pour de meilleurs rendements.

Ainsi, pour des EO commerciaux,

1) établir les caractéristiques biochimiques des EO et leur vitesse de minéralisation du N disponible selon deux températures et deux types de cannebergière (matures ou jeunes),
2) établir au champ leur impact sur la dynamique du N disponible, l'activité biologique et la nutrition N de la culture
3) établir le lien entre la dose d'apport et le rendement produit.
4) calculer les coûts de fertilisation et les revenus et comparer les marges sur coûts variables.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 VOLET 1 – CINÉTIQUE DE MINÉRALISTION DES ENGRAIS ORGANIQUES EN CONDITIONS CONTRÔLÉES

2.1.1 Échantillonnage des sols et caractérisation physicochimique

Deux types de sols sableux de cannebergières différant en nombre d'années de production ont été étudiés. Un sol « jeune» en 1ère année de production et un sol « mature » en production depuis 13 ans. Les échantillons de sol pour la caractérisation physicochimique ont été échantillonnés à la tarière après le dégel au printemps 2019, avant le retour d'une activité plus intense des microorganismes du sol. Les échantillons ont été conservés à 4 °C dans une glacière et transportés au Laboratoire d'analyse agroenvironnementale de l'IRDA (Laboratoire). Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des productions végétales du Québec 1993). La matière organique (MO) a été obtenue par perte au feu. Les ions nitrates ($N\text{-}NO_3$) et ammonium ($N\text{-}NH_4$) ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson 1976) et déterminés par colorimétrie avec un auto-analyseur Technicon. Le P, le K et les éléments mineurs potentiellement disponibles ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et coll. 1993) et dosés à l'ICP optique. Le C labile soluble à l'eau (C_{eau}) a été extrait selon la méthode proposée par Garcia et coll. (1990). Le même extrait à l'eau a servi également à doser le N organique labile ($N_{org\text{-}eau}$) dosé par colorimétrie au Technicon. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivi d'un tamisage des sables (Gee et Bauder 1986).

Les volumes de sol servant à réaliser les incubations d'EO ont été prélevés au même moment que les échantillons de caractérisation physicochimique. Les sols ont été mis en réserve en attendant le début des incubations. Cela permettait aussi de conserver le sol dans son état printanier, avec les populations microbiennes et les pools de nutriments présents à ce moment. Ainsi, le sol de chacune des deux cannebergières a été prélevé sur une superficie de 1 m^2 et sur une profondeur de 10 cm, immédiatement sous le tapis végétal (Figure 1). Les sols ont ensuite été rapportés au Laboratoire, conservés à 4 °C pour une courte période de 4 jours avant d'être tamisés à 4 mm et séchés à l'air. Par la suite, 24 à 48 h plus tard, les deux types de sols ont été tamisés à 2 mm et remis à sécher jusqu'à siccité. Une fois secs, les sols ont été entreposés dans des sacs de plastique à température pièce pendant 12 semaines, soit jusqu'au début de l'incubation.

Figure 1. Zone de prélèvement de sol de 1 m^2 sur 10 cm d'épaisseur (strate 0-10 cm), printemps 2019.

2.1.2 Caractérisation des engrais organiques

Quatre engrais organiques commerciaux ont été caractérisés de façon exhaustive avant d'être ajoutés aux sols pour l'expérience d'incubation : les fientes granulées de poules (Actisol (5-3-2)) de la compagnie Acti-Sol, les fientes granulées de

poules + farine de sang de la COOP Vivaco (Vivaco (11-2-2)), une solution d'acides aminés d'origine marine (Trident (6-1-1)) de Organic Ocean et des granules de luzerne (Luzerne (2,5-0,3-2)) de la compagnie Eco-Luzerne. Ils ont été caractérisés pour le pH_{eau}, le taux de matière sèche à 105 °C (MS) et le taux de MO (perte au feu). Le C_{tot} des engrais a été calculé avec la méthode des cendres selon la formule '100-cendres' pour obtenir la quantité de MO, elle-même ensuite divisée par le facteur 2,0 qui est plus juste dans le cas des amendements et engrais organiques que le facteur 1,724 utilisé pour les sols (Giroux et Audesse 2004). Le N_{tot} a été extrait selon la méthode Kjeldahl (NTK) (exclu le nitrate). Le ratio C/N a été calculé en divisant le C obtenu par la méthode des cendres par le N_{tot} (NTK + $N\text{-}NO_3$) (base sèche (b.s.)). Les ions de nitrate ($N\text{-}NO_3^-$) et d'ammonium ($N\text{-}NH_4^+$) ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson 1976) et déterminés par colorimétrie avec un auto-analyseur Technicon. Les contenus en P, K, Ca et Mg totaux ont été extraits par digestion à l'acide sulfurique (voie humide) (Isaac et Johnson 1976), suivie d'une détermination par spectrométrie d'émission au plasma. Le P minéral résistant a été extrait au HCl 2,5M (P_{HCl}) (Salomons et Gerriste 1981), puis déterminé par colorimétrie automatisée Technicon. Le C labile (C_{eau}), le N organique labile ($N_{org\text{-}eau}$) ainsi que le N minéral labile ($N\text{-}NH_{4\text{-}eau}$ et $N\text{-}NO_{3\text{-}eau}$) ont été extraits d'un même échantillon selon la méthode proposée par Garcia et coll. (1990) puis dosés par colorimétrie au Technicon. Le P labile (P_{eau}) a été dosé selon la méthode de Sissingh (1971). Enfin, l'indice de stabilité biologique (ISB), qui permet de rendre compte de la résistance d'une matière organique à la dégradation par les microorganismes du sol, a été mesuré selon la méthode décrite dans Landry et coll. (2011) adaptée de L.E. Parent de la méthode originale AFNOR (XP U44-162) utilisant un digesteur de fibre (ANKOM 200) de la compagnie ANKOM Technology.

2.1.3 Dispositifs et traitements

La méthode de l'incubation en conditions contrôlées a été utilisée pour évaluer l'influence du degré de maturité des sols et de la température ambiante sur l'activité de minéralisation du N_{org} en $N\text{-}NH_4$ et $N\text{-}NO_3$ selon différents engrais organiques, tout en contrôlant les autres paramètres (aération, humidité) qui influencent également l'activité des populations microbiennes responsables de la minéralisation.

Ainsi, les sols jeunes et matures ont été soumis chacun à deux températures différentes, soit 23 °C (Figure 2) et 14 °C (Figure 3) (un incubateur différent par température), choisies lors de séances de travail avec les intervenants du milieu pour refléter des conditions printanières froides ou chaudes. Pour chacune des incubations, le dispositif était un plan en parcelles partagées deux fois (split-split-plot) de quatre répétitions, avec le type de sol en parcelle principale, le type d'engrais en sous-parcelle et le temps d'échantillonnage (nombre de jours d'incubation) en sous-sous-parcelle afin de s'assurer que tous les effets de position des échantillons dans l'incubateur soient annulés. Les incubations ont été réalisées en 2019 avec les EO Actisol, Vivaco et Trident (Tableau 1) et en 2021 avec les granules de luzerne (Tableau 2) (N.B. Le projet a été mis sur pause en 2020 en raison de la pandémie de COVID-19). Lors de chaque incubation, une régie 100 % minérale (sulfate d'ammonium 21-0-0) et un sol sans apport d'engrais servaient de témoins.

Chaque unité expérimentale était constituée d'un pot de plastique opaque de 500 ml. Chaque pot contenait 200 g de sol sec plus l'un ou l'autre des amendements. Chacun des traitements (sauf le témoin) a ainsi reçu une dose équivalente de 200 mg N_{tot} kg^{-1} de sol sec (Gagnon et coll. 2012). La quantité d'engrais organique à amender a été déterminée à la suite des analyses de contenus en N total citées plus haut. Préalablement à l'ajout des engrais dans chacun des pots, les 200 g de sol sec ont été humidifiés à capacité au champ (CC) (voir section 2.1.4) et incubés pendant 10 jours à l'une ou l'autre des températures testées. Cette pratique visait à réactiver la vie microbienne et ainsi éviter de mesurer le pic de minéralisation de l'azote du sol associé à la reprise de la vie microbienne (Zaouchi 2015). Le couvercle de plastique de chaque pot était aussi percé de 3 petits trous pour permettre les échanges d'air tout en évitant une évaporation trop rapide de l'eau des sols. Après ces dix jours, l'humidité de tous les pots a été réajustée à la capacité au champ par différence de poids, avec de l'eau déminéralisée. Les engrais ont ensuite été ajoutés puis mélangés au sol avec une tige de verre, puis ils ont été immédiatement replacés dans l'incubateur.

Un échantillonnage destructif (4 répétitions) a par la suite été réalisé à chacun des 7 temps d'échantillonnage (jours d'incubation) des sols, soit après 0, 3, 7, 14, 28, 56 et 112 jours d'incubation, pour un total de 560 unités expérimentales (280 unités/température) en 2019 (Tableau 1) et 336 unités expérimentales (168 unités/température) en 2020 pour des périodes d'incubation de 0, 3, 7, 14, 28, 56 et 72 jours (Tableau 2). À chacun des temps, l'azote disponible sous les formes

$N\text{-}NH_4$ et $N\text{-}NO_3$ a été extrait au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminés par colorimétrie avec un auto-analyseur Technicon. De plus, la MS (% séché à l'air) du sol a été mesurée. Le pH_{eau} a été suivi aux temps 3, 14, 28, 56 et 112 jours. Tout au long de l'expérience, les conditions d'humidité et d'aération ont été contrôlées par un suivi régulier visant à maintenir la teneur en eau des sols entre 75 et 100 % de la CC. L'humidité était ajustée à chaque semaine par différence de poids, avec de l'eau déminéralisée. Enfin, toutes les analyses ont été débutées dès le jour de réception des échantillons au laboratoire afin de s'assurer de ne pas prolonger le temps d'incubation des sols pendant les manipulations. Le Tableau 3 résume les différentes opérations complétées pour le volet 1.

Tableau 1. Paramètres d'incubations des engrais Actisol, Vivaco et Trident de 2019.

Température d'incubation (°C)	Types de sol	Type d'engrais	Nb. de temps d'échantillonnage[1]	Répétitions
14	Sol 1ière année production	Témoin sans engrais	7	4
		Témoin + 21-0-0	7	4
		Actisol	7	4
		Vivaco	7	4
		Trident	7	4
	Sol 13ième année production	Témoin sans engrais	7	4
		Témoin + 21-0-0	7	4
		Actisol	7	4
		Vivaco	7	4
		Trident	7	4
23	Sol 1ière année production	Témoin sans engrais	7	4
		Témoin + 21-0-0	7	4
		Actisol	7	4
		Vivaco	7	4
		Trident	7	4
	Sol 13ième année production	Témoin sans engrais	7	4
		Témoin + 21-0-0	7	4
		Actisol	7	4
		Vivaco	7	4
		Trident	7	4

[1] Nombre de jours d'incubation après lesquels un échantillonnage destructif était prévu : 0, 3, 7, 14, 28, 56 et 112 jours

Tableau 2. Paramètres d'incubations de l'engrais Luzerne de 2021.

Température d'incubation (°C)	Types de sol	Type d'engrais	Nb. de temps d'échantillonnage[1]	Répétitions
14	Sol 1ière année production	Témoin sans engrais	7	4
		Témoin + 21-0-0	7	4
		Luzerne	7	4
	Sol 13ième année production	Témoin sans engrais	7	4
		Témoin + 21-0-0	7	4
		Luzerne	7	4
23	Sol 1ière année production	Témoin sans engrais	7	4
		Témoin + 21-0-0	7	4
		Luzerne	7	4
	Sol 13ième année production	Témoin sans engrais	7	4
		Témoin + 21-0-0	7	4
		Luzerne	7	4

[1] Nombre de jours d'incubation après lesquels un échantillonnage destructif était prévu : 0, 3, 7, 14, 28, 56 et 72 jours

	B1		B2		B3		B4	
	S1	S2	S2	S1	S2	S1	S1	S2
	M3	M3	M5	M5	M4	M4	M3	M3
arrière de l'étage	T28	T56	T14	T56	T28	T56	T3	T112
	T3	T112	T3	T28	T56	T28	T14	T7
	T56	T14	T56	T7	T3	T7	T28	T28
	T7	T3	T112	T14	T7	T14	T112	T56
	T14	T28	T7	T112	T14	T112	T56	T14
Avant de l'étage	T112	T7	T28	T3	T112	T3	T7	T23
	S1	S2	S2	S1	S2	S1	S1	S2
	M5	M5	M1	M1	M2	M2	M4	M4
	T112	T28	T28	T56	T3	T28	T14	T56
	T28	T3	T14	T112	T112	T7	T56	T112
	T56	T56	T112	T3	T14	T3	T7	T28
	T14	T7	T3	T14	T56	T112	T3	T14
	T3	T14	T7	T28	T7	T14	T112	T3
	T7	T112	T56	T7	T28	T56	T28	T7
	S1	S2	S2	S1	S2	S1	S1	S2
	M2	M2	M3	M3	M5	M5	M1	M1
	T28	T112	T28	T7	T28	T56	T14	T56
Étage	T14	T14	T112	T56	T56	T28	T3	T7
	T7	T28	T3	T112	T3	T7	T112	T3
	T3	T7	T14	T28	T112	T3	T56	T112
	T56	T56	T7	T3	T14	T112	T7	T28
	T112	T3	T56	T14	T7	T14	T28	T14
	S1	S2	S2	S1	S2	S1	S1	S2
	M1	M1	M4	M4	M3	M3	M2	M2
	T3	T14	T112	T56	T14	T7	T112	T56
	T28	T28	T7	T3	T112	T14	T28	T14
	T7	T112	T28	T28	T3	T112	T56	T7
	T14	T7	T3	T112	T56	T28	T7	T3
	T112	T3	T56	T7	T28	T3	T14	T28
	T56	T56	T14	T14	T7	T56	T3	T112
	S1	S2	S2	S1	S2	S1	S1	S2
	M4	M4	M2	M2	M1	M1	M5	M5
	T7	T3	T112	T112	T28	T56	T112	T3
	T14	T28	T3	T28	T112	T3	T7	T112
	T56	T14	T56	T3	T7	T28	T3	T56
	T3	T7	T14	T56	T56	T14	T28	T28
	T112	T112	T28	T14	T14	T7	T14	T14
	T28	T56	T7	T7	T3	T112	T56	T7

B1-B4	Répétition 1-4
S1	Sol jeune
S2	Sol mature
M1	Témoin
M2	Minéral
M3	Actisol
M4	Vivaco
M5	Trident
T(nb jours d'incubation)	échantillon (pot blanc)

Figure 2. Schéma du plan d'expérience (dispositif) dans l'incubateur maintenu à 23 °C en 2019.

B1-S1	**M2**	**M3**	**M1**	**M5**	**M4**
	T14	T56	T56	T28	T3
	T7	T112	T14	T3	T112
	T112	T28	T3	T56	T28
	T56	T23	T112	T7	T56
	T28	T14	T7	T112	T7
	T3	T7	T28	T14	T14
B1-S2	**M2**	**M3**	**M1**	**M5**	**M4**
	T3	T112	T56	T112	T14
	T112	T28	T112	T28	T56
	T14	T3	T14	T56	T112
	T56	T14	T28	T3	T28
	T7	T56	T3	T14	T7
	T28	T7	T7	T7	T3
B2-S2	**M3**	**M4**	**M2**	**M1**	**M5**
	T7	T28	T28	T7	T7
	T56	T3	T56	T56	T3
	T112	T56	T14	T3	T56
	T28	T14	T112	T28	T112
	T3	T7	T3	T14	T14
	T14	T112	T7	T112	T28
B2-S1	**M3**	**M4**	**M2**	**M1**	**M5**
	T112	T112	T3	T7	T112
	T28	T28	T7	T3	T56
	T56	T56	T56	T14	T3
	T14	T14	T28	T112	T14
	T3	T7	T14	T28	T7
	T7	T3	T112	T56	T28
B3-S1	**M5**	**M2**	**M3**	**M4**	**M1**
	T28	T56	T14	T14	T7
	T14	T28	T112	T3	T112
	T3	T112	T56	T56	T28
	T7	T3	T28	T112	T3
	T112	T7	T3	T28	T14
	T56	T14	T7	T7	T56
B3-S2	**M5**	**M2**	**M3**	**M4**	**M1**
	T7	T7	T14	T14	T3
	T14	T28	T56	T28	T14
	T28	T112	T28	T3	T7
	T3	T14	T3	T56	T112
	T56	T56	T112	T7	T28
	T112	T3	T7	T112	T56
B4-S1	**M1**	**M5**	**M4**	**M3**	**M2**
	T56	T28	T56	T28	T7
	T7	T3	T3	T7	T56
	T3	T112	T112	T3	T3
	T112	T7	T28	T14	T14
	T28	T14	T7	T112	T112
	T14	T56	T14	T56	T28
B4-S2	**M1**	**M5**	**M4**	**M3**	**M2**
	T3	T112	T56	T7	T7
	T112	T56	T7	T3	T56
	T56	T14	T3	T14	T112
	T28	T28	T28	T112	T14
	T7	T7	T112	T56	T3
	T14	T3	T14	T28	T28

arrière de l'étage

Avant de l'étage

Étage

B1-B4	Répétition 1-4
S1	Sol jeune
S2	Sol mature
M1	Témoin
M2	Minéral
M3	Actisol
M4	Vivaco
M5	Trident
T(nb jours d'incubation)	échantillon (pot blanc

Figure 3. Schéma du plan d'expérience (dispositif) dans l'incubateur maintenu à 14 °C en 2019.

Tableau 3. Calendrier des opérations principales du Volet 1- incubation

Opérations	2019	2021
Échantillonnage des sols :		
Sol de cannebergière mature	2 mai	.
Sol de cannebergière jeune	7 mai	.
Séchage et tamisage des sols (à 4 mm puis à 2 mm)	8-19 mai	.
Pesée des 200 g de sol dans chacune des unités expérimentales (pot)	2 août	22 juillet
Humidification des sols 10 jours dans chaque pot avant le début de l'incubation	9 août	
Ajustement de l'humidité, ajout des engrais et début de l'incubation (T0)	19 août	2 août
Échantillonnage et caractérisation des traitements :		
T3	22 août	5 août
T7	26 août	9 août
T15	3 septembre	16 août
T28	16 septembre	30 août
T57	15 octobre	27 septembre
T72	.	15 octobre
T112	9 décembre	.

2.1.4 Détermination de la capacité au champ des sols

Le sol séché et tamisé des deux sites (sol jeune et mature) a été utilisé pour remplir sans compaction des bacs distincts pour ensuite les saturer en eau pendant 24 heures. Le surplus d'eau (en surface) a été retiré et des échantillons ont été prélevés avec des cylindres en acier inoxydable de masse et de volume connus (6 cm de diamètre et 6,3 cm de hauteur, 3 cylindres/type de sol). Immédiatement après la saturation, la masse des différents échantillons a été consignée avec une balance précise au 0,01 g (Shimadzu, Tx4202L) pour déterminer la teneur en eau volumique du sol à la saturation. Ensuite, pour déterminer la capacité au champ (CC) du sol, les échantillons ont été placés sur une grille pour permettre le ressuyage pendant 24 heures après l'épisode de saturation. La masse des échantillons a ensuite été consignée de nouveau. Une fois ces deux points mesurés, les échantillons ont été séchés (100 °C pendant 48 heures) et pesés. Par différence de poids, la quantité d'eau à ajouter au sol sec pour atteindre la CC a pu être déduite.

2.1.5 Analyses statistiques

Une analyse de variance avec chaque essai de température a été réalisée pour comparer les effets des traitements en utilisant un modèle mixte, avec la procédure *Proc mixed* du logiciel SAS pour tenir compte des effets fixes et aléatoires du modèle. De plus, une courbe a été ajustée pour décrire la minéralisation du N_{org} en fonction du temps avec chacun des EO testés en comparaison aux témoins sans engrais et avec engrais minéral. Les analyses ont été conduites par la biostatisticienne de l'IRDA, Michèle Grenier. Les analyses ont permis de voir l'effet du temps, de la température, du type de sol et du type d'engrais.

2.2 VOLET 2 – ESSAIS DES ENGRAIS ORGANIQUES AU CHAMP

2.2.1 Choix du site

La cannebergière choisie pour réaliser les essais en champ devait démontrer, par des analyses foliaires (automne précédent), que les besoins en N moyens étaient d'au moins 45 kg N_{eff} ha^{-1} (~60 kg N_{tot} ha^{-1}) afin d'avoir un dispositif qui répondait aux ajouts de N. Pour cette raison, la cannebergière plus mature du Volet 1, située à Saint-Louis de Blandford, a été sélectionnée (Figure 4). Celle-ci présentait par ailleurs un type de sol plus représentatif de ceux retrouvés au sein des cannebergières les plus répandues au Québec. L'essai a été répété pendant deux saisons de croissance (2021 et 2022) dans le même champ, mais à un emplacement différent à chaque année pour éviter l'effet résiduel des engrais organiques. Le cultivar Stevens a

été sélectionné, car il est le plus utilisé. Une attention particulière a été portée pour qu'il n'y ait pas de variabilité génétique du cultivar dans l'essai. Les propriétés physicochimiques de la couche de surface (0-10 cm) sont présentées au Tableau 4.

Figure 4. Site d'essai, cannebergière en 16e année de production, 31 mai 2022.

Tableau 4. Caractéristiques physicochimiques du sol au site d'étude au printemps avant tout apport d'engrais.

Paramètres	2021	2022
pH_{eau}	4,6	4,7
Matière organique (%) (PAF)	2,5	2,6
$N\text{-}NO_3$ (kg ha^{-1} b.s.) (KCl)	0	0
$N\text{-}NH_4$ (kg ha^{-1} b.s.) (KCl)	1,16	1,45
Densité apparente (0-10 cm) (g $cm3^{-1}$)	0,88	1,11
Texture	Sable	Sable
Éléments majeurs Mehlich-3 (M3) (kg ha^{-1} b.s.)		
P	286	284
K	80	86
Ca	113	167
Mg	25	29
Al (mg kg^{-1})	1030	1025
ISP_2[1](%)	9,7	9,8

b.s. = base sèche

[1] $ISP_2 = [(P/31)/((Al/27)+(Fe/56))]_{M3}$

2.2.2 Dispositif et traitements

Les EO testés lors du volet incubation (Volet 1), excepté l'engrais Vivaco puisque ce produit a été abandonné par le fabriquant, ont été évalués en conditions commerciales au champ. Le dispositif comprenait 17 traitements de fertilisation, répétés quatre fois, selon un plan en blocs complets aléatoires, pour un total de 68 parcelles de 3 x 4 m, plus une bordure de 0,5 m entre chaque parcelle (voir Annexe, p. 47). Le dispositif visait à établir une courbe de réponse de la culture à des apports croissants d'EO, seuls ou en combinaison. Les traitements de fertilisation ont été apportés en trois fractionnements à partir du stade floraison jusqu'au grossissement des fruits. La répartition de la dose totale de N a été réalisée selon les recommandations de l'agronome : 20 % du N apporté à 30-35 % floraison, 55 % du N apporté à 50-60 % de la floraison et 25 % du N apporté à 50 % de la nouaison (S. Marchand, comm. pers. 2021). Les engrais ont été appliqués manuellement de

sorte que les opérations de fertilisation du producteur dans le reste du champ ont dû être évitées en tout temps dans la zone de l'essai. Les autres opérations du producteur (phytoprotection, irrigation) ont été réalisées comme à l'habitude dans l'essai et le reste du champ. Après chaque application d'engrais, 10 L d'eau étaient apportés dans chacune des parcelles afin de permettre à l'engrais de bien s'incorporer au sol. L'eau était appliquée manuellement au moyen d'arrosoirs et répartie uniformément sur toute la superficie. Dans les parcelles fertilisées au moyen du Trident (fertilisation liquide diluée dans l'eau) les litres d'eau apportés étaient soustraits des 10 L requis afin que chaque parcelle reçoive une quantité égale d'humectation.

Les EO ont été testés à quatre doses croissantes de N total (0, 25, 50 et 75 kg N ha^{-1}) visant couvrir les quantités de N_{eff} similaires à celles employées habituellement par les producteurs, en moyenne de 50 kg N_{eff} ha^{-1}. Les coefficients d'efficacité du N (CEN) de tous les EO n'étant pas connus, les apports de N ont en effet été basés sur leurs contenus en N_{tot} afin d'éviter tout biais. Considérant la grande labilité des EO testés, il était raisonnable de penser que leur CEN était élevé, entre 75 – 90 %, d'où des apports de N_{tot} plafonnant à 75 kg N_{tot} ha^{-1}. Les engrais granulaires Actisol (5-3-2) et Luzerne (2,5-0,3-2) ont été testés seuls ou en combinaison avec l'engrais liquide Trident (6-1-1). Le Trident est en effet toujours utilisé comme engrais complémentaire à la fertilisation de base, le plus souvent à des doses d'environ 5 kg N total ha^{-1}. Le Trident remplaçait 25 % du N_{tot} des engrais granulaires à chacune des doses (Trident : 6,3, 12,6 et 18,9 kg des 25, 50 et 75 kg N_{tot} ha^{-1}). Les quantités de Trident étaient réparties sur les 3 fractionnements saisonniers (1/3 de la dose totale visée) (ex. dose de 75N : 18,9 kg N Trident divisés en 3 apports). Une combinaison Luzerne 60 % - Actisol 40 % a également été testée aux mêmes 4 doses croissantes (0, 25, 50 et 75 kg N ha^{-1}). Le Tableau 5 résume les apports de N_{tot} et les fractionnements de chacune des régies de fertilisation testée. Pour les autres éléments, le P n'a pas été ajusté pour être équivalent dans tous les traitements puisque des travaux antérieurs ont montré que les besoins en P de la canneberge étaient négligeables et que cette différence n'aurait aucun effet sur les traitements (Parent et Marchand 2006). Les apports de K ont, quant à eux, ont été ajustés dans tous les traitements avec du sulfate de K lorsque nécessaire (autorisé en production biologique), permettant aux divers traitements de recevoir la dose recommandée (CRAAQ 2010).

Tableau 5. Répartition des apports en N dans la saison en fonction des différentes régies de fertilisation.

RÉGIES	TRAIT.	Doses N_{tot} kg ha^{-1}	Doses N_{tot} lb ac^{-1}	Apports en N_{tot} (kg ha^{-1})								
				Actisol			Luzerne			Trident		
				Fract 1	Fract 2	Fract 3	Fract 1	Fract 2	Fract 3	Fract 1	Fract 2	Fract 3
Témoin sans N	T1	0	0									
Actisol	T2	25	22	5,0	13,8	6,3						
	T3	50	45	10,0	27,5	12,5						
	T4	75	67	15,0	41,3	18,8						
Luzerne	T5	25	22				5,0	13,8	6,3			
	T6	50	45				10,0	27,5	12,5			
	T7	75	67				15,0	41,3	18,8			
Luzerne/Actisol (60/40)	T8	25	22	2,0	5,5	2,5	3,0	8,3	3,8			
	T9	50	45	4,0	11,0	5,0	6,0	16,5	7,5			
	T10*	75	67	6,0	16,5	7,5	9,0	24,8	11,3			
Luzerne/Trident (75/25)	T12	25	22	3,7	10,3	4,7				2,1	2,1	2,1
	T13	50	45	7,5	20,6	9,4				4,2	4,2	4,2
	T14	75	67	11,3	30,9	14,1				6,3	6,3	6,3
Actisol/Trident (75/25)	T15	25	22	3,7	10,3	4,7				2,1	2,1	2,1
	T16	50	45	7,5	20,6	9,4				4,2	4,2	4,2
	T17	75	67	11,3	30,9	14,1				6,3	6,3	6,3

* Le T11 n'est pas présenté.

2.2.3 Analyses statistiques

Pour les variables de types végétales (rendement, potentiel de rendement, qualité des fruits, taux de nouaison, teneur en N des feuilles, etc.), l'effet du type d'engrais et de la dose de N ont été analysés avec la procédure mixed de SAS selon un modèle linéaire ou quadratique mixte qui intègre l'effet aléatoire de l'année et des blocs dans l'année (Littell et coll. 2006).

Les rendements ont été calculés en utilisant les mesures du CETAQ combinées à celles de l'IRDA pour 2021. En 2022, seuls les rendements IRDA étaient disponibles. Afin de compléter les conclusions du modèle linéaire/quadratique, une analyse de variance (ANOVA) a été effectuée sur les valeurs relatives par rapport au témoin (ROM = $Y_{fertilisé}/Y_{témoin}$) en considérant la dose de N et le type d'engrais comme des effets fixes, avec l'année et les blocs dans l'année comme effets aléatoires. La dose 100 N a été exclue de ces ANOVA afin d'avoir une structure factorielle complète. Lorsque les analyses de variance affichaient un effet significatif ($P < 0,05$) ou une tendance ($0,05 \leq P \leq 0,1$), une comparaison des moyennes a été effectuée au moyen de tests de Student.

Pour les variables de sol (C et N-NH_4 soluble à l'eau, C et N total microbien, respiration, l'activité uréase, etc.), les cinq types d'engrais à la dose 50 N et le témoin ont été comparés entre eux, par période, par une ANOVA en considérant les traitements comme effets fixes, avec l'année et les blocs dans l'année comme effets aléatoires. Lorsque les analyses de variance affichaient un effet significatif ($P < 0,05$) ou une tendance ($0,05 \leq P \leq 0,10$), une comparaison des moyennes a été effectuée au moyen de tests de Student. Dans le cas de l'analyse des MEI, les effets fixes de la période et de l'interaction traitement × période ont été ajoutés à l'effet des traitements. De plus, l'effet période a été considéré comme un effet de mesures répétées. Une structure de corrélations a été modélisée afin de tenir compte des corrélations entre ces mesures.

2.3 COLLECTE DE DONNÉES

Le Tableau 6 présente les différentes opérations réalisées au champ pour les années 2021 et 2022. Les sous-sections suivantes décrivent comment les données ont été collectées à chacune de ces opérations.

Tableau 6. Calendrier des principales opérations culturales et d'échantillonnages des essais, saisons 2021 et 2022.

Opérations	2021	2022
Piquetage, installation des sondes de température, caractérisation du sol	7 mai	5 mai
Caractérisation des engrais organiques	7 mai	13 mai
Inondation des bassins (retrait des sondes de température)	25 mai – 8 juin	30 mai – 5 juin
Piquetage des zones de prise de données	8 juin	17 juin
Stade crochet – Mesure du potentiel de rendement	8 juin	17 juin
Installation des membranes d'échanges ioniques (MEI)	11 juin	20 juin
Caractérisation du sol et fractionnement #1 de l'engrais	22 juin	27 juin
Caractérisation du sol et fractionnement #2 de l'engrais	28 juin	4 juillet
Caractérisation du sol post-fractionnement #2 (20 parcelles)	30 juin	6 juillet
Fractionnement #3 de l'engrais	5 juillet	13 juillet
Caractérisation du sol 7 jours post-fractionnement #3	12 juillet	20 juillet
Évaluation du statut foliaire	7 septembre	6 septembre
Caractérisation du sol	8 septembre	6 septembre
Retrait final des MEI et des sondes de température	27 septembre	6 octobre
Récolte des fruits	4 octobre	3 octobre
Caractérisation du sol fin de saison	4 octobre	27 septembre
Récolte des fruits (deuxième année croissance) dans l'essai de 2021	NA	26 septembre

2.3.1 Analyses physiques, chimiques et biologiques du sol et des engrais

Le Tableau 7 résume les différents paramètres analysés et les temps d'échantillonnage des saisons 2021 et 2022. Toutes les analyses de caractérisation du sol ont été effectuées sur la strate 0-10 cm et les sols ont été prélevés à la tarière. Les échantillons étaient des composites de 6 sous-échantillons. Ainsi, au printemps, par bloc, les analyses suivantes ont été effectuées selon les mêmes méthodes décrites précédemment : pH_{eau}, éléments Mehlich-3 [P, K, Ca, Mg, Al], % MO, N-NO_3 et N-NH_4 (KCl 2M), C et N totaux (Leco), granulométrie et humidité. En saison, par parcelle, le N_{min} (N-NO_3 + N-NH_4 au KCl 2M) a été dosé juste avant le fractionnement #2 et au stade d'analyse foliaire. Les formes solubles de C_{eau}, $N_{org\text{-}eau}$ et N_{min}

(extraits à l'eau) et l'activité uréase ont été dosés 2 jours après le 2ième fractionnement dans les parcelles témoins 0 N et dans celles ayant reçu la dose de 50 kg N_{tot} ha^{-1} de chacun des engrais (sauf régie Luzerne-Trident) (total : 20 parcelles). Pour ces mêmes 20 parcelles, 1 semaine après le 3ième fractionnement, une analyse plus poussée a été effectuée. Ainsi, en plus des formes solubles de C_{eau}, $N_{org\text{-}eau}$ et N_{min} (extraits à l'eau), le taux d'activité microbienne du sol a été mesuré par le dégagement de CO_2 et l'activité uréase. Également, les contenus en C et N de la biomasse microbienne ont été déterminés en utilisant la méthode de fumigation-extraction directe au chloroforme avec 10 g de sol humide et du chloroforme sans éthanol pour la fumigation et du K_2SO_4 à 0,5 M comme extractif (1:4 sol). La concentration en N de la biomasse a été calculée comme suit : [(azote extractible total après fumigation- azote extractible total avant fumigation) / 0,54] et la concentration en C de la biomasse a été obtenue en soustrayant le C extractible, déterminé par un analyseur TOC Sievers Innovox (GE Analytical Instrument, Boulder, CO, États-Unis) avant et après la fumigation du sol, puis en divisant par une valeur d'efficacité d'extraction de 0,45 (Voroney et coll. 2008). Lors de tous les échantillonnages, les sols ont été placés dans une glacière et conservés à 4 °C au réfrigérateur jusqu'à leur préparation et analyse au laboratoire. Enfin, comme les trois engrais organiques avaient été caractérisés en détail pour l'incubation (Volet 1), une caractérisation plus succincte a été effectuée lors de l'application au champ afin de s'assurer que leurs caractéristiques étaient similaires aux lots précédents. Ainsi, les paramètres suivants ont été analysés sur un échantillon composite selon les méthodes détaillées à la section 2.1.2 : le taux de MS à 105 °C et le taux de MO, le C_{tot}, le N-NO_3 et le N-NH_4. Le N_{tot} (NTK) ainsi que les contenus totaux en P, K, Ca et Mg.

Tableau 7. Résumé des paramètres d'analyses du sol et des temps d'échantillonnage dans le dispositif pendant une saison de croissance.

Paramètres de sol (0-10 cm)	Print. [1]	Avant fract. #2[2]	1 sem. post dernier fract. #3	Statut foliaire	Récolte
	Avril	50-60 % floraison	Juillet	1ère sem. sept.	Octobre
Azote minéral N-NH_4 +N-NO_3 (0-10 cm) (KCl)	4	68		68	
pH_{eau}, MO (PAF), Mehlich-3 (P, K, Ca, Mg, Al)	4				
N et C total (LECO)	4				
Extraction à l'eau : $C_{org\text{-}eau}$ + N-$NH_{4\text{-}eau}$		20[3]	20[3]		
Granulométrie	1				
% humidité à 105°C			20[3]		
MVA	4	4	4	4	4
Taux respiratoire microbien (CO_2)			20[3]		
Uréase			20[3]		
C et N de la biomasse			20[3]		

[1] Un échantillon composite par bloc. Les mesures aux autres dates sont par parcelle.

[2] Les sols pour le dosage du N_{min} KCl ont été échantillonnés juste avant le 2e apport d'engrais mais ceux pour les paramètres solubles à l'eau et l'uréase ont été prélevés 2 jours après l'apport des EO au 2e fractionnement.

[3] Pour ces analyses, seules les parcelles des traitements 0 N et 50 N ont été échantillonnées et la régie Luzerne-Trident était exclue pour un total de 20 parcelles.

2.3.2 Suivi in situ des membranes d'échanges ioniques (MEI)

Des membranes d'échange ioniques (MEI) (anionique AR204-SZRA et cationique CR67-HMR, Ionics Inc., Watertown, MA) ont été installées dans le sol dès le début de la saison et sont demeurées en permanence jusqu'à la récolte en les changeant à tous les 7 ou 14 jours (Tableau 8). Sous forme de petites plaquettes de vinyle mesurant 5,4 x 2,4 cm, elles ont permis de simuler l'activité des racines en captant de façon cumulatives les ions NO_3^- et NH_4^+ se rendant jusqu'à elles. En effet, les MEI contiennent des groupements chargés, saturés d'un contre-ion. Ce contre-ion est relâché dans le sol en échange des ions ciblés pour lesquels les groupements possèdent une affinité beaucoup plus grande. Ceci assure la sorption *in situ*, en continu, des ions ciblés par l'étude et leur retenue sur les MEI jusqu'à ce que celles-ci soient récupérées au champ et que les ions soient extraits au laboratoire. Trois paires de MEI, anionique (NO_3^-) et cationique (NH_4^+) ont donc été insérées à trois

endroits distincts (Figure 5) dans les parcelles du témoin 0 N et dans celles de la dose ciblée de 50 kg N_{tot} ha^{-1} de chacun des engrais (Actisol, Luzerne ou les combos Actisol/Trident et Luzerne/Actisol), de façon à couvrir verticalement le milieu de la strate 0-10 cm de sol. Elles ont été installées en dehors des zones de mesure du rendement et d'échantillonnage de sol et de plants afin d'éviter les perturbations autour d'elles. Pour les cinq premières semaines suivant leur installation, les MEI ont été laissées au sol pour des périodes de 7 jours avant d'être remplacées par de nouvelles. Par la suite, elles ont été laissées au champ pour des périodes successives de deux semaines, jusqu'à la récolte (octobre) pour un total de 10 périodes (cinq de 1 semaine et cinq de 2 semaines) (Tableau 8). Ce suivi en continu a permis de comprendre la dynamique des ions NO_3^- et NH_4^+ du sol sur la saison, i.e. leurs fluctuations (ex. délais de fourniture, pics de disponibilités, intervalles de valeurs). Les analyses ponctuelles (N-NO_3 et N-NH_4 extrait KCl 2M) de sol ont cependant été faites en parallèle car les MEI mesurent des intensités (µg cm^{-2} $période^{-1}$) et ne permettent pas d'établir des contenus en ppm.

Avant leur emploi au champ, les MEI anioniques et cationiques ont été nettoyées par agitation dans une solution de HCl 0,5M en séquence de 30 minutes. Elles ont ensuite été rincées trois fois à l'eau déminéralisée pour enlever toute trace d'acide. Puis, elles ont été saturées par agitation dans une solution de $NaHCO_3$ 0,5M, changée aux heures pour une période de 5 heures. Les MEI ont à nouveau été rincées à l'eau déminéralisée trois fois, puis conservées dans l'eau à 4 °C jusqu'à leur utilisation. Lors de leur récupération au champ, les trois paires de MEI déterrées ont été nettoyées à l'eau déminéralisée et placées ensemble dans un tube d'extraction contenant une solution de KCl 2M. Au laboratoire, les tubes ont été agités deux heures et la solution extractive filtrée. Par la suite, le N-NH_4 et le N-NO_3 de cette solution ont été dosés au Technicon. Les flux ont été exprimés par unité de surface de MEI, par période, soit en µg cm^{-2} $période^{-1}$ (WesternAg 2019).

Tableau 8. Périodes de changement des membranes d'échange ioniques (MEI) pendant les saisons 2021 et 2022.

Période	Dates d'installation et de retrait des MEI	
	2021	2022
Installation	11 juin	20 juin
1	22 juin	27 juin
2	28 juin	4 juillet
3	5 juillet	13 juillet
4	12 juillet	20 juillet
5	19 juillet	27 juillet
6	2 août	10 août
7	16 août	24 août
8	30 août	7 septembre
9	13 septembre	21 septembre
10	27 septembre	6 octobre

Figure 5. Insertion d'une membrane d'échange ionique au champ.

2.3.3 Développement, nutrition et rendements des plants

En juin (2021 : 8 juin, 2022 : 17 juin), au stade crochet, le nombre de tiges avec bourgeons végétatifs et reproductifs a été compté dans chaque parcelles dans quatre (1 pi^2) (2021) et trois quadrats (0,75pi^2) (2022) métalliques de 6 × 6 po en bordure de la zone de rendement (Figure 7). Cette mesure a permis de calculer la densité de tiges annuelles (tiges végétatives + tiges productives) et de calculer le potentiel de rendement théorique de l'année en cours afin de s'assurer de l'uniformité du dispositif pour tester les régies de fertilisation. Le calcul du potentiel de rendement se fait selon une formule utilisant le nombre de tiges reproductives par unité de surface, développée par Fruit d'or pour la variété Stevens (non publiée).

Un mois avant la récolte (2021 : 7 septembre; 2022 : 6 septembre), le statut nutritionnel (analyse foliaire) des plants a été évalué en prélevant un échantillon de 200 pousses annuelles par parcelle (Figure 7) constitué à 50 % de pousses reproductives et à 50 % de pousses végétatives selon la méthode décrite par Parent et Marchand (2006). Les pousses prélevées étaient placées dans une glacière et conservés à 4 °C puis mises à sécher à 65 °C pour obtenir la biomasse sèche et broyés à 100 mesh pour doser leurs contenus en éléments totaux (C_{tot} et N_{tot}) par combustion LECO ainsi que les éléments totaux P, K, Ca et Mg par digestion à l'acide nitrique et au peroxyde d'hydrogène puis dosés à l'ICP optique selon la méthode adaptée des USA (Gavlak et coll. 2005).

En octobre (2021 : 4 octobre; 2022 : 26 septembre (retour dans le dispositif de 2021) et 3 octobre (dispositif de 2022)), les fruits et les tiges annuelles ont été récoltés manuellement dans les zones dédiées de chacune des parcelles (2021 : 2 quadrats de 6 po x 6 po + 4 quadrats de 1 $pied^2$; 2022 : 2 quadrats de 6 po x 6 po) (Figure 7 et Figure 8). Les tiges reproductives et végétatives ont été dénombrées (densité), de même que le nombre d'attaches florales sur chaque tige productive. Le taux de nouaison a été calculé selon l'équation suivante :

Taux de nouaison = Nombre de fruits total/nombre d'attaches florales ×100

Les fruits ont été comptés, pesés et classés en fruits vendables ou non vendables. Les causes de déclassement étaient : fruit avorté, fruit pourri ou présentant des dommages (insectes ou mécaniques), ou trop petit. À noter que tous les rendements sont présentés en livres à l'acre (lb ac^{-1}) afin de se référer à l'unité usuelle utilisée dans le secteur de production de la canneberge. Le potentiel de rendement a également été mesuré à nouveau à la récolte pour calculer l'atteinte du potentiel de rendement selon l'équation suivante :

Atteinte du potentiel de rendement = rendement en fruits total/potentiel de rendement (mesuré à la récolte)

La qualité des fruits a aussi été évaluée par le Club Environnemental Technique Atocas Québec (CETAQ) sur l'ensemble des canneberges récoltées à l'intérieur de quadrats de 1 pi^2 (2021 : 4 quadrats; 2022 : 3 quadrats) disposés aléatoirement dans la zone de rendement. Les paramètres de qualité étaient : nombre de fruits totaux et vendables, taux d'anthocyanes, degré Brix et fermeté. De plus, un sous-échantillon de fruits d'environ 300 g a été mis à sécher à 65 °C pour obtenir la biomasse sèche et pour effectuer le dosage du N_{tot} (LECO) pour calculer les exportations. Enfin, les exportations en N par les fruits ont été calculées selon l'équation suivante :

Exportations de N (kg ha^{-1}) = Rendement total (sur base sèche) en fruits (kg ha^{-1}) × concentration en N des fruits (%)

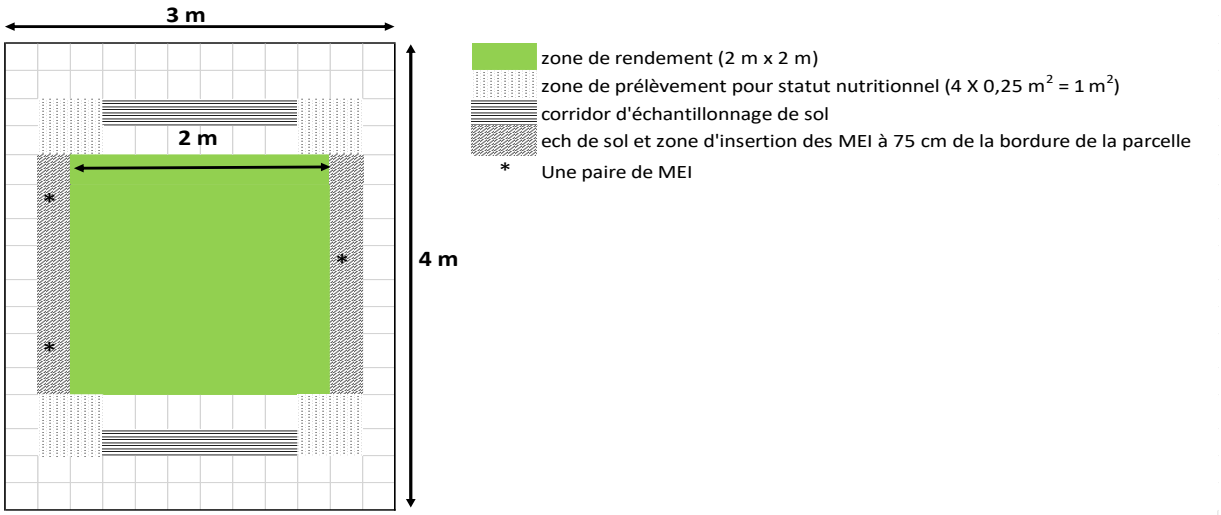


Figure 6. Schéma d'une parcelle et des zones d'échantillonnage et de prise de mesures

Figure 7. Prélèvement des rendements en fruits, quadrats de 6 po x 6 po, 4 octobre 2021.

2.3.4 Arrière-effet des régies de fertilisation sur les rendements de l'année suivante

En cours de projet, devant les différences de rendements obtenus à l'automne 2021 selon les régies de fertilisation testées, il a été décidé d'évaluer leur arrière-effet sur les rendements en fruits de 2022 de la même zone d'essai dans trois des quatre répétitions du dispositif. Les rendements vendables et non vendables ont été mesurés et les tiges (tiges productives et végétatives) ont été dénombrées tel que décrit à la section précédente (section 2.3.3). Cependant, pour des questions budgétaires, la mesure de qualité des fruits par le CETAQ n'a pas été répétée. À noter qu'en 2022, le dispositif de 2021 a reçu une fertilisation NPK uniforme dans toutes les parcelles et celle-ci était pour le N de 62,5 kg N_{tot} ha^{-1} à partir d'Actisol (57N) et de Trident (5,5 N).

2.3.5 Suivi de la température du sol et des données météorologiques et d'irrigation

Tout au long de l'expérience, les paramètres climatiques ont été suivis avec une station météorologique sur l'entreprise et un pluviomètre installé à proximité du dispositif, dans un endroit non soumis aux précipitations venant des épisodes d'irrigation. L'irrigation par gicleur a quant à elle été suivie avec les relevés tensiométriques du producteur dans le champ à l'étude. Pour la température du sol, des sondes de température de type Hobo pendant (modèle ONSET UA-001-64) ont été installées dans le sol à 12 endroits dans le dispositif, soit dans 3 parcelles/bloc, choisies aléatoirement pour couvrir l'ensemble du dispositif. Elles ont été positionnées à 1 cm, directement sous le matériel herbacé et à 10 cm de profondeur afin de capter la température du sol en continu, du printemps jusqu'à la récolte. Trois sondes de température ont également été installées aléatoirement dans le dispositif à la hauteur de la canopée, pendant toute la saison de croissance. Lors des épisodes de saturation du sol en eau, les Hobo ont été temporairement retirés puis replacés dès les jours suivants afin d'éviter un bris des équipements.

2.4 ANALYSE ÉCONOMIQUE

L'analyse économique a été réalisée sur l'analyse combinée des rendements des dispositifs 2021 et 2022, situés côte-à-côte, dans le même champ, afin de tenir compte du caractère bisannuel de la culture, mais également afin d'éviter l'arrière-effet des fertilisants appliqués la saison précédente. Ainsi, les rendements mesurés en 2022 dans le dispositif de 2021 ne sont pas considérés dans l'analyse économique. L'AGDEX 233.19/821 – Canneberges biologiques – Budget (CRAAQ 2017), qui est, à notre connaissance, le document le plus à jour pour cette culture, a été exploité pour cette analyse. L'information présente dans l'AGDEX étant relativement peu détaillée (aucune ventilation des coûts variables), elle a été complétée en consultant l'entreprise Fruit d'Or (Jocelyne Moreau – communication personnelle). Les prix des intrants sont ceux qui avaient cours lors des années de l'étude et proviennent des fournisseurs. Les prix de vente de la canneberge biologique proviennent de l'Association des producteurs de canneberge du Québec (APCQ) pour les saisons 2021 et 2022.

Les paramètres suivants ont été utilisés pour les calculs.

- Coûts variables de l'AGDEX 233.19/821 – Canneberges biologiques – Budget (CRAAQ 2017).
- Prix des intrants selon leur valeur en 2021-2022 – données du milieu.
- Coûts additionnels pour l'application de l'engrais liquide Trident - données du milieu.
- Rendements vendables de chacune des régies testées – données issues de l'étude – moyennes statistiques (ANOVA) des rendements des saisons 2021 et 2022 combinées.
- Prix de vente du marché de la canneberge biologique en 2021-2022 – données recensées à l'APCQ.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 VOLET 1 – CINÉTIQUE DE MINÉRALISATION DES ENGRAIS ORGANIQUES EN CONDITIONS CONTRÔLÉES

Les caractéristiques physicochimiques des sols utilisés pour incuber les divers engrais organiques (EO) provenant d'une cannebergière jeune ou mature sont présentées au Tableau 9. Il en ressort que les deux sols sont typiques de cette production, soit des sables (93-98 %) acides très pauvres en matières organiques (MO) et éléments nutritifs, en comparaison d'autres sols agricoles québécois. Cela dit, les taux de MO et de N_{tot} sont plus élevés dans le sol cumulant plusieurs années d'exploitation, probablement suivant l'accumulation des résidus de culture (Tableau 9). L'indice de saturation du sol en phosphore (ISP_2) et le contenu en K sont également plus élevés, probablement en lien avec des apports répétés, sur les 13 années de production, d'engrais organiques riches en P et K puisque les contenus en Al des deux sols, élément plutôt lié à leur genèse, sont similaires. À ce propos, la saturation en P des sols est une problématique répandue en production biologique puisque les engrais organiques, riches en N efficace, sont le plus souvent également riches en P_{tot} avec des ratios N_{eff}/P_{tot} faibles. La comparaison de l'ISP_2 du sol jeune, à 4,2 %, et de celui du sol mature, à 12,6 %, illustre ce phénomène. À une valeur de 12,6 %, l'ISP_2 dépasse la valeur critique environnementale de 11 % (CRAAQ 2010). Cette hausse de l'ISP_2 amène un défi important dans la fertilisation azotée qui motive la recherche d'engrais organiques azotés de haut ratio N_{eff}/P_{tot} (Landry et coll. 2023).

Par ailleurs, la capacité anticipée de fourniture en N des deux sols est estimée comme faible à nulle. Ceci se constate d'une part par les contenus en N_{min} très faibles (N-NO_3 et N-NH_4) de 1,07 mg N_{min}/kg b.s en moyenne (Tableau 9). En comparaison, des teneurs en N_{min} avant fertilisation de 2 à 6 mg kg^{-1} b.s. sont habituelles dans les sols agricoles à textures moyennes à grossières (Landry et coll. 2021, Landry et coll. 2022a, Landry et coll. 2022b). La très faible production de N_{min} lors de l'incubation démontre aussi la faible fertilité N de ces sols. En effet, après 112 jours d'incubation, les contenus N_{min} des deux sols témoins sans apport d'EO n'étaient encore que de 9,0 et 9,6 mg N_{min} kg^{-1} b.s., alors que ceux des sols incubés avec EO atteignaient des valeurs jusqu'à 206,6 mg N_{min} kg^{-1} b.s (données non illustrées).

Tableau 9. Caractéristiques physicochimiques des sols incubés en conditions contrôlées.

Paramètres	Sol jeune	Sol mature
pH_{eau}	5,13	4,58
Matières organiques (%) (PAF)	0,62	2,13
C_{tot} (%) (Leco)	0,212	0,927
$C_{org.-eau}$ (%) (Garcia)	0,004	0,018
N_{tot} (%) (Leco)	0,007	0,026
N_{-NO3} (kg ha^{-1} b.s.) (KCl)	0,08	0,07
N_{-NH4} (kg ha^{-1} b.s.) (KCl)	0,86	1,12
$N_{org-eau}$ (%) (Garcia)	0,0002	0,0006
C/N	30	35
Texture	Sable (98%)	Sable (93%)
Densité apparente (0-10 cm) (g $cm^{3\ -1}$)	1,44	1,55
Éléments majeurs Mehlich-3 (M3) (kg ha^{-1} b.s.)		
P	111	336
ISP_2[1] (%)	4,2	12,6
K	27	57
Ca	87	149
Mg	11	27
Al (mg kg^{-1})	961	939

b.s. : base sèche

[1] Indice de saturation spécifique aux sols acides de cannebergières. $ISP_2 = [(P/31)/((Al/27)+(Fe/56))]_{M3}$

Les caractéristiques des EO incubés sont présentées au Tableau 10 sur base humide, tels qu'utilisés (kg t^{-1} appliqué). Il existe des différences importantes entre eux. D'une part, le Trident est un engrais liquide (44,2 % MS) produit à base d'algues marines et riche en N_{tot}. Celui-ci contient une concentration de N par tonne (kg t^{-1}) plus élevée que l'Actisol qui est pourtant un engrais granulé solide (89,8 % MS). De plus, il présente le ratio N_{min}/N_{tot} de loin le plus élevé, soit environ 10 x celui des autres EO, et un des C/N les plus bas. Enfin, tout son contenu en C_{org} est soluble (C_{eau}) ce qui en fait un produit hautement instable (labile) (ISB non dosable). Son ajout au sol lors de l'incubation devrait donc être très stimulant pour l'activité microbienne (application foliaire en champ). Les produits Vivaco et Actisol sont similaires à la base. Ils sont constitués tous les deux de fientes granulées de poules et présentent une MS autour de 88 %. Cependant, le Vivaco contient une part de farine de sang. Ceci hausse sa concentration en N_{tot} à plus de 100 kg t^{-1}, soit le double de celui de l'Actisol et abaisse d'autant son C/N puisque leur contenu en C_{org} est similaire (moy. 393 kg C_{org} t^{-1} b.s.). Le Vivaco contient cependant 40 % plus de C_{eau} b.h. (C labile), ce qui devrait en faire un produit davantage stimulant (ISB inférieur) pour l'activité microbienne que l'Actisol qui est pourtant reconnu pour sa minéralisation rapide (Landry et coll., 2018; Landry et coll. 2019, Landry et coll. 2023). Enfin, les granules de luzerne présentent la plus faible teneur en N_{tot} et également le C/N le plus élevé (3-6 x plus que les autres EO), de même qu'un pH acide. Ainsi, malgré un ISB faible et une proportion de C_{eau} intermédiaire entre le Vivaco et l'Actisol, ce produit ne présente pas des caractéristiques optimales pour la production de N_{min}. Cependant, il présente, en comparaison d'EO issus d'engrais de ferme (Vivaco, Actisol), très peu de P pour une teneur similaire en K, ce qui était d'intérêt considérant la hausse des ISP_2 des sols de cannebergières découlant de l'application d'EO de faible ratio N_{eff}/P_{tot} comme l'Actisol (ration N/P le plus bas des EO testés). De plus, le K contenu dans les granules de luzerne est soluble à 94 %, en comparaison de 59 % pour les granules d'Actisol (Landry et coll. 2023), ce qui lui conférait un intérêt potentiel pour la nutrition potassique de la culture (apport recommandé de 65-110 kg ha^{-1} dans les sols contenant moins de 115 kg K_{M3} ha^{-1} b.s.; CRAAQ 2010).

Tableau 10. Caractérisation physicochimique des engrais organiques incubés en conditions contrôlées, sur base tel que reçu.

Paramètres	Trident	Vivaco	Actisol	Luzerne
pH	6,38	7,83	7,35	5,91
Matière Sèche (%) b.s.	44,2	87,2	89,8	90,7
Matière organique (%) b.s.	93,9	82,9	74,5	90,5
$C_{org.}$ total (%) b.s.	46,9	41,4	37,2	45,2
C_{eau} (kg t^{-1})	207*	320,2	228,1	244,7
ISB global	N/A*	10,3	12,2	12,7
Fraction soluble (%)	N/A*	88,7	68,3	59,7
N_{tot} Kjeldahl (kg t^{-1})	63,5	110,1	50,0	25,4
N-NO_3 (KCl) (kg t^{-1})	0,003	0,007	0,066	0,170
N-NH_4 (KCl) (kg t^{-1})	13,9	2,1	1,4	0,3
N_{min}/N_{tot} (%)	21,83	1,91	2,93	1,85
C/N	3,3	3,3	6,7	18,7
P_{tot} (kg t^{-1})	0,043	10,5	14,3	3,0
P_{eau} (kg t^{-1})	0,038	1,8	1,4	N/D
P_{HCl} (kg t^{-1})	0,015	4,5	8,7	1,4
P_{eau}/P_{tot} (%)	89,0	17,1	9,7	N/D
P_{HCl}/P_{tot} (%)	34,7	43,3	61,1	46,7
N_{tot} /P_{tot}	1486,9	10,5	3,5	8,5
Autres éléments totaux (kg t^{-1})				
K	1,9	9,5	21,7	23,0
Ca	0,6	20,3	34,9	12,1
Mg	0,2	1,6	5,3	2,2
K/(Ca+Mg)	2,31	0,43	0,54	1,61

* L'ISB ne peut se faire sur une solution. Le produit est considéré hautement labile avec une hypothèse de 100 % du C total comme étant soluble.

Selon les résultats de l'incubation, la production de N_{min} (Delta N_{min}) a été influencée par l'âge des cannebergières (années en production) et les températures d'incubation (Tableau 11). Ainsi, les sols jeunes produisent moins de N_{min} que les sols matures et les sols froids produisent moins de N_{min} que les sols plus chauds. L'âge a cependant eu plus d'impact que la température. Pour une même température, le ratio N_{min} jeunes/matures varient de 62-84 % (14 °C) ou de 58-92 % (23 °C), tandis que pour un même âge, le ratio N_{min} 14°C/23°C est de 89-97 % (sols jeunes) ou de 87-100 % (sols matures). Ainsi, en termes de vitesse de production (pente de l'équation, b), les sols jeunes sont beaucoup plus affectés par les basses températures. En effet, le froid y ralentit considérablement la production de N_{min} (pente de la cinétique de minéralisation). Ainsi, dans les sols jeunes, les pentes sont 2,0 – 7,7 fois moindres dans les sols froids vs. les sols plus chauds, tandis que dans les sols matures, les pentes sont peu réduites, entre 1,1-1,3 fois, selon les produits.

C'est cependant la nature des produits qui a eu le plus grand impact sur la disponibilité en N_{min} du sol, dès l'ajout de ceux-ci aux sols, de même qu'après 112 jours d'incubation. Rappelons que les produits ont tous été apportés sur la base d'une même quantité de N_{tot} (200 kg N_{tot} ha^{-1} sur b.h. tel qu'utilisé) afin que la quantité finale de N_{min} produite ne soit pas liée à la quantité totale de N apportée, mais bien aux caractéristiques des EO et aux conditions d'incubation imposées par le sol et la température. Conséquemment, le Trident (44 % MS), le Vivaco (87 % MS), l'Actisol (90 % MS) et Luzerne (91 % MS) ont été apportés à un équivalent de 3,1, 1,8, 4,0 et 7,9 t ha^{-1} b.h., respectivement. Les données d'incubation présentées au Tableau 11 et à la Figure 9 doivent donc être analysées principalement pour la teneur initiale en N_{min} suivant l'apport des EO, la pente de la courbe (valeur de b) qui renseigne sur la vitesse de minéralisation et la production totale de N_{min} (Delta = N_{min} final – initial) en 112 jours.

Selon les courbes de minéralisation (Figure 12), de façon globale, il peut être conclu que le Vivaco est un produit intermédiaire entre le Trident et l'Actisol. Le Trident permet la plus forte disponibilité de N_{min} à l'application (N_{min} initial moy. 58 kg N_{min} ha^{-1}) (Actisol 10 kg N_{min} ha^{-1}; Vivaco et Luzerne 0-6 kg N_{min} ha^{-1}). Ceci concorde avec son ratio N_{min} /N_{tot} élevé qui fait en sorte que pour une même cible de 200 kg N_{tot} ha^{-1}, le Trident apporte environ 10× plus de N_{min} que les autres EO. Le Trident est aussi le produit le plus réactif (b = 0,374 – 2,872), ce qui était attendu étant donné que 100 % de son C_{org} est labile (C_{eau}). Il minéralise donc plus rapidement que les autres EO dont les pentes sont majoritairement inférieures (Actisol, b = 0,284 - 0,801; Vivaco, b = 0,105- 0,272; Luzerne, b = 0,0-0,017). Il plafonne aussi le plus haut avec des teneurs finales en N_{min} similaires à celles du Vivaco dans les sols jeunes (Trident/Vivaco = 1- 1,07), mais plus élevées dans les sols matures (Trident/Vivaco = 1,15- 1,20) où elles sont très proches de celles du témoin minéral, surtout dans les sols plus chauds (14°C : 169 vs. 190 kg N_{min} ha^{-1}; 23°C : 183 vs. 193 kg N_{min} ha^{-1}). Le Vivaco présente toutefois un potentiel de minéralisation très élevé puisque presque tout le N_{min} mesuré sur 112 jours provient de la transformation du N_{org} de départ. Ceci lui confère les plus grands deltas de production avec 1,2- 1,8 x plus de N_{min} produit que le Trident ou l'Actisol durant l'incubation. Dans une situation où les EO seraient incorporés au sol, le Trident et le Vivaco seraient donc les deux EO fournissant le plus de N_{min} à la culture, le Trident étant plus indiqué si l'on vise une disponibilité élevée en moins de 10 jours puisque le Vivaco plafonne autour de 30 jours (la pratique régulière pour le Trident est cependant l'application foliaire). Quant à lui, l'Actisol permet un apport de N_{min} à l'application intermédiaire, moindre que le Trident mais plus élevé que le Vivaco. Il minéralise aussi plus vite que le Vivaco, mais moins que le Trident et plafonne sous ces deux EO. L'Actisol peut donc s'avérer un choix intéressant si un produit rapide est recherché, mais offrant une production moins grande en N_{min} afin d'éviter le développement végétatif excessif. Pour sa part, la Luzerne s'est avérée un produit peu réactif (b = 0,0-0,017), très affectée par la température du sol. Dans les sols à 23°C, il a produit environ la moitié du N_{min} des autres EO et ce, malgré le fait que le produit était sous forme de poudre dans l'incubation (en champs, les granules ont été utilisés). En sols froids (14 °C), aucun N_{min} n'a été produit. L'emploi de luzerne semble donc peu approprié pour la fertilisation printanière (températures fraîches), d'autant plus que la création d'un arrière-effet est à éviter. Ce risque est d'ailleurs accru avec la forme granulée utilisée au champ puisque les granules se dégradent moins vite que la poudre (moins de contact du produit avec le sol). D'ailleurs, lors des essais terrain, plusieurs granules étaient encore observables sur le sol en cours d'été (Figure 8). L'emploi au champ de la luzerne demanderait assurément des travaux afin de développer une régie appropriée tenant compte de sa vitesse de minéralisation et de l'impact de la température.

En résumé, les sols nouvellement mis en culture possèdent une moins bonne capacité de production de N_{min} à partir d'EO que les sols des sites plus matures, et cela d'autant plus que le sol est froid, et le type d'engrais organiques fait la plus grande différence sur la disponibilité en N_{min} dans les jours suivant l'application, sur la vitesse à laquelle le N_{org} sera minéralisé et sur

la quantité finale de N_{min} qui sera produite sur la saison. Enfin, quel que soit l'EO, exception faite de la luzerne, le processus de minéralisation plafonnait en dedans de 30 jours.

Figure 8. Granules de luzernes non décomposés retrouvés au champ lors des essais au moment de la récolte.

Tableau 11. Paramètres de production de N_{min} des divers engrais organiques incubés selon le type de sol et la température.

Sols (années d'exploitation)	Températures (°C)	Engrais organiques	Équations[1]	Contenu en N_{min} du sol (kg ha^{-1} b.s.)[3]		
				Initial[3]	Final[3]	Delta 112 jrs
Jeune (1 an)	14	Trident	$y = 62,79 + 68,81*(1-e^{-0,374(x)})$	62,8	131,6	68,8
		Vivaco	$y = -2,95 + 125,9*(1-e^{-0,105(x)})$	0	122,9	122,9
		Actisol	$y = 9,80 + 83,5*(1-e^{-0,395(x)})$	9,8	93,3	83,5
		Luzerne[2]	-	15,0	15,0	0
	23	Trident	$y = 57,72 + 79,61*(1-e^{-2,872(x)})$	57,7	132,0	74,3
		Vivaco	$y = 5,26 + 127,0*(1-e^{-0,272(x)})$	5,3	132,2	126,9
		Actisol	$y = 8,44 + 93,77*(1-e^{-0,801(x)})$	8,4	102,2	93,8
		Luzerne	$y = 3,04 + 80,8*(1-e^{-0,017(x)})$	3,0	78,1	75,1
Mature (13 ans)	14	Trident	$y = 57,20 + 111,8*(1-e^{-0,412(x)})$	57,2	169,0	111,8
		Vivaco	$y = -4,84 + 151,8*(1-e^{-0,120(x)})$	0	147,0	147,0
		Actisol	$y = 8,68 + 102,7*(1-e^{-0,284(x)})$	8,7	111,4	102,7
		Luzerne[2]	-	5,3	5,3	0
	23	Trident	$y = 54,57 + 128,4*(1-e^{-0,440(x)})$	54,6	183,0	128,4
		Vivaco	$y = 0,495 + 153,1*(1-e^{-0,128(x)})$	0,50	153,6	153,1
		Actisol	$y = 13,62 + 102,2*(1-e^{-0,371(x)})$	13,6	115,8	102,2
		Luzerne	$y = -5,54 + 178,7*(1-e^{-0,004(x)})$	0	83,4	83,4

[1] L'équation est de formule : $y = y0 + a*(1-e^{-b(x)})$. Le symbole b représente la pente de l'équation. [2] Dans les sols à 14°C, la luzerne a été incubée 74 jours et aucune minéralisation n'a eu lieu. [3] Valeurs moyennes initiale et maximale prédites du modèle. Le Delta est obtenu en soustrayant de la valeur maximale, la valeur initiale.

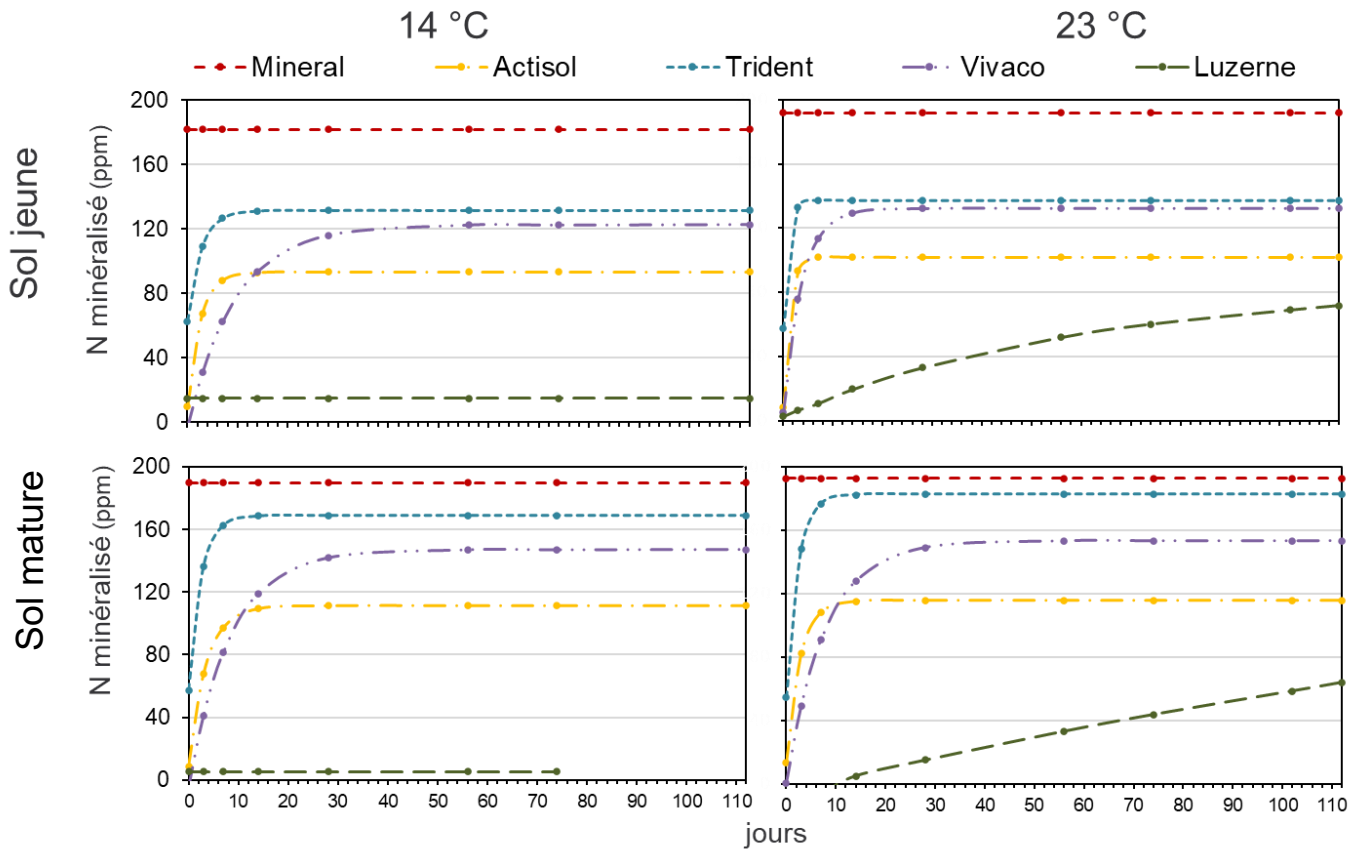


Figure 9. Minéralisation du N_{org} en N minéral ($N\text{-}NH_4$ + $N\text{-}NO_3$) des divers engrais organiques pendant 112 jours en fonction du type de sol de cannebergière (jeune ou mature) et de la température d'incubation (14 ou 23 °C).

Tableau 12. Proportion de N_{min} fournie par les divers EO incubés sur la quantité initiale de N_{tot} appliqué selon le type de sol et la température.

Sols	Temp. (°C)	Engrais organiques	N_{min} apporté	N_{org} apporté	N_{min} produit (112 jrs)	N_{min} fourni (112 jrs)	Taux minéralisation N_{org}	Ratio N_{min} fourni / N_{tot} apporté
			(kg ha^{-1} b.s.)				(%)	
Jeune (1 an)	14	Trident	62,8	137	68,8	131,6	50	66
		Vivaco	0,0	200	122,9	122,9	61	61
		Actisol	9,8	190	83,5	93,3	44	47
		Luzerne	15,0	185	0,0	15,0	0	8
	23	Trident	57,7	142	74,3	132,0	52	66
		Vivaco	5,3	195	126,9	132,2	65	66
		Actisol	8,4	192	93,8	102,2	49	51
		Luzerne	3,0	197	75,1	78,1	38	39
Mature (13 ans)	14	Trident	57,2	143	111,8	169,0	78	85
		Vivaco	0,0	200	147,0	147,0	74	74
		Actisol	8,7	191	102,7	111,4	54	56
		Luzerne	5,3	195	0,0	5,3	0	3
	23	Trident	54,6	145	128,4	183,0	88	92
		Vivaco	0,5	200	153,1	153,6	77	77
		Actisol	13,6	186	102,2	115,8	55	58
		Luzerne	0,0	200	83,4	83,4	42	42

Dans le cas précis des EO incubés dans ce projet, sur la quantité initiale de N organique apportée (entre 137 - 200 kg N_{org} ha^{-1}), de 0 à 88 % ont été minéralisés en N_{min} (Tableau 12). Si l'apport total de 200 kg N_{tot} ha^{-1} est considéré, la quantité de N_{min} fourni sur 112 jours, combinant le N_{min} présent au départ dans l'EO lors de l'application, plus le N_{min} produit par minéralisation, c'est entre 3 et 92 % de la valeur cible de 200 kg N_{tot} ha^{-1} qui a été atteint. Il faut toutefois garder en tête que les incubations sont réalisées sous des conditions contrôlées et que ces valeurs ne sont probablement pas celles atteintes en champ ou les conditions de températures et d'humidité du sol sont variables, auxquelles s'ajoutent également des facteurs de pertes non présents en conditions contrôlées. Les taux de fourniture en N des EO en champ sur la base du N_{tot} apporté sont donc probablement moindres, sous les 70 %, tel qu'il est souvent considéré pour les engrais organiques solides (CRAAQ 2013).

Dans un exercice théorique, si seules les valeurs du Trident et de l'Actisol utilisées dans les régies les plus performantes de l'essai au champ sont considérées, le taux de fourniture en N_{min} en sol jeune et froid a été respectivement de 66 et 47 %. À l'opposé, le taux de fourniture en N_{min} en sol mature et chaud a été respectivement de 92 et 58 %. Avec ces valeurs, pour atteindre un apport recommandé de 45 kg N_{min} ha^{-1} (CRAAQ 2010, Hart et coll. 2015) en utilisant une régie Actisol-Trident (75/25) si le Trident était appliqué au sol, il faudrait :

- En sol jeune et froid : 126 kg N_{tot} ha^{-1} (Actisol : 102 kg N_{tot} ha^{-1} + Trident 24 kg N_{tot} ha^{-1})
- En sol mature et chaud : 100 kg N_{tot} ha^{-1} (Actisol : 83 kg N_{tot} ha^{-1} + Trident 17 kg N_{tot} ha^{-1})

Ces quantités sont donc plus élevées que l'apport souvent visé de 64 kg N_{tot} ha^{-1} (45 kg N_{eff} ha^{-1}), avant facteurs de pertes.

3.2 VOLET 2 – ESSAIS DES ENGRAIS ORGANIQUES AU CHAMP

3.2.1 Conditions météorologiques saisonnières

Selon les résumés disponibles en ligne (Morneau 2021, Fruit d'Or 2024a), le début de saison 2021 a été caractérisé par un printemps très hâtif, à la fin mars, mais en dents de scie, parsemé de nuits de gel. La glace a fondu plus tôt, laissant les plants sans protection devant les gels survenus en avril et mai. Par la suite, les conditions de pollinisation ont été favorables et la période de mise à fruit a été accompagnée de pluies régulières. En été, une sécheresse et un temps très chaud ont sévi (occurrence de canicules). En automne, le rougissement des fruits a toutefois bien été. Finalement, les récoltes ont été dans la moyenne ou inférieures à ce qui était attendu. À l'opposé, en 2022, les conditions climatiques ont été idéales pour la croissance des fruits tout au long de la saison de production (Radio-Canada 2023, Samson 2023, Fruit d'Or 2024b). Les écarts de température ont été minimes et le froid a tardé à arriver. Ainsi, il n'y a pas eu d'extrêmes, pas de période de très grand froid au printemps ni de canicule prolongée durant l'été. Les bourgeons ont ainsi été gardés intacts et ont pu mûrir en abondance. Pour de nombreux producteurs, la quantité de fruits produits s'est approchée du double d'une récolte dite normale. La récolte a donc été qualifiée d'exceptionnelle, tant sur le plan de la qualité des fruits, que de la quantité. En ce qui a trait aux conditions climatiques spécifiques aux sites d'essais, celles-ci sont rapportées à la Figure 10 et à la Figure 11. Les deux années, il y a peu de différences entre les températures du sol à 1 et 10 cm de profondeur. De même, les températures de la canopée n'ont été que légèrement plus élevées que celles du sol, excepté en 2021 pendant un mois, entre la fin juillet et la fin août. Ceci correspond avec la chaleur rapportée pour la saison 2021. Les précipitations enregistrées durant cette période ont également été plus rares et de peu de millimètres. Cependant, puisque les sites sont tous sous irrigation, la tension journalière moyenne s'est maintenue autour de la ligne de 5 kPa, tel que recommandé pour cette culture (Labarre et coll. 2022). De plus, les sondes de températures ont bien enregistré le printemps plus frais de 2021, en comparaison de celui de 2022 (14,4 vs. 16,7 °C). Les deux automnes ont présenté des températures similaires.

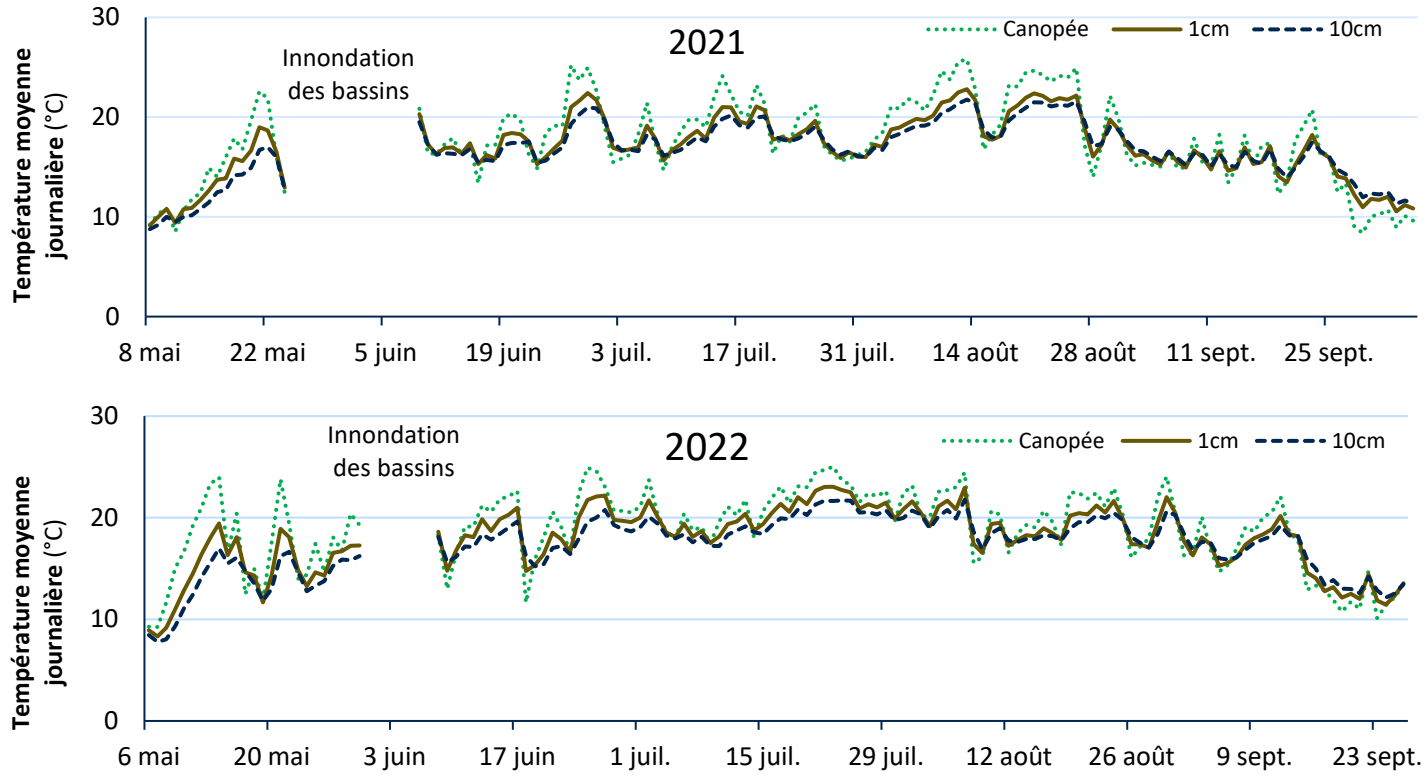


Figure 10. Température de l'air au niveau de la canopée des plants de canneberge et température du sol à 1 cm et 10 cm de profondeur, pendant les saisons de croissance 2021 et 2022.

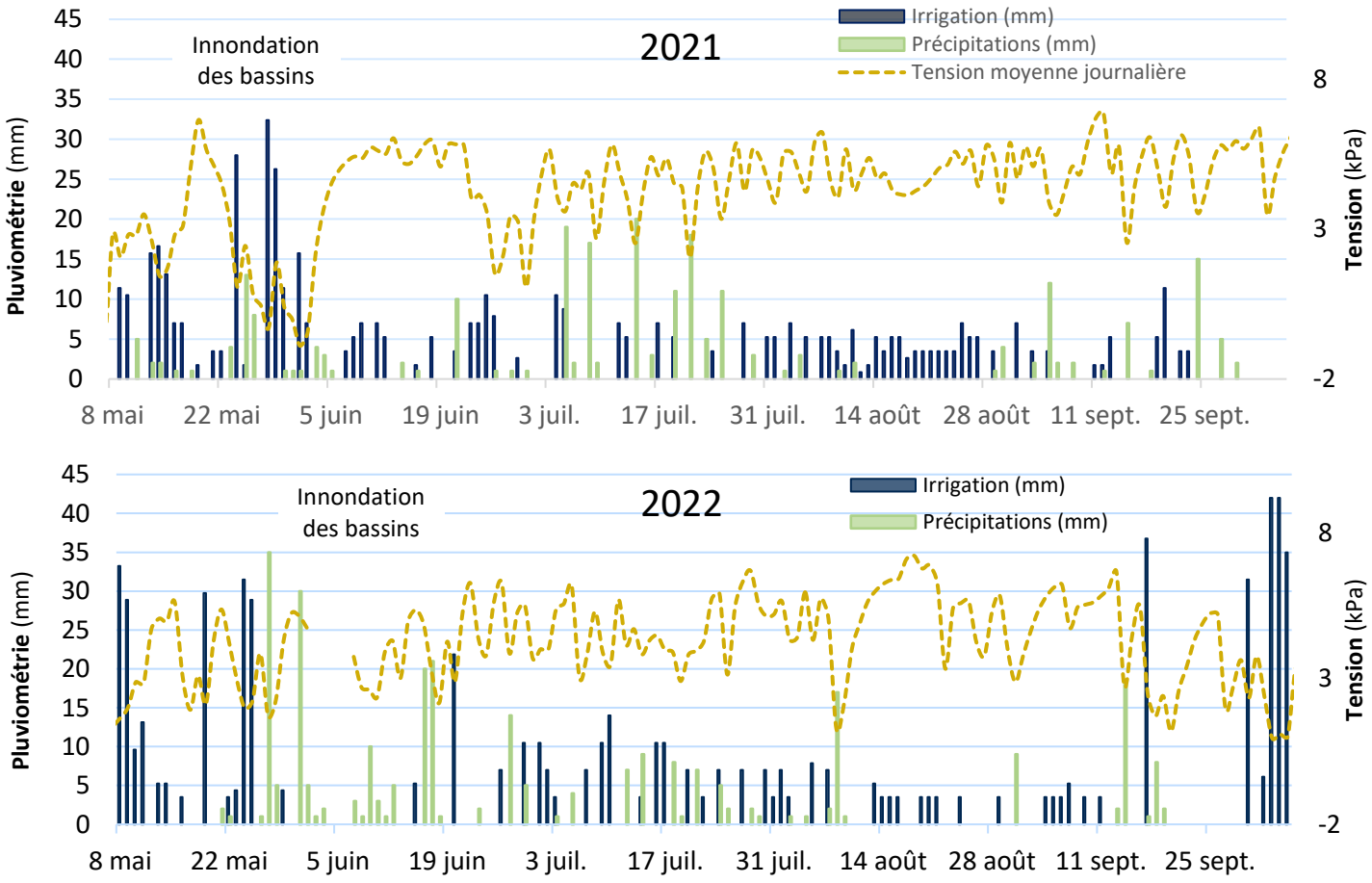


Figure 11. Tension du sol et apport d'eau par les précipitations et l'irrigation par gicleur, pendant les saisons de croissance 2021 et 2022.

3.2.2 Indicateurs de rendement

Plusieurs indicateurs descriptifs du rendement ont été mesurés en début et fin de saison de chaque année d'étude. La fertilisation a eu un effet sur l'ensemble de ceux-ci, dont certains de façon très marquée.

3.2.2.1 Potentiel de rendement du champ à l'étude (printemps)

En tout début des essais, avant la fertilisation, le potentiel de rendement (variété Stevens) a été mesuré dans toutes les parcelles pour en connaître la variabilité au travers des zones d'étude. En 2021, ce potentiel était en moyenne de 35 411 lb ac^{-1}, avec une densité de 347 tiges pi^{-2}. En 2022, il était de 23 168 lb ac^{-1}, avec une densité similaire de 472 tiges pi^{-2}. La nature bisannuelle de la canneberge explique cette diminution du potentiel de rendement de la zone d'essais 2022, en comparaison de la zone 2021. Dans cette culture, le rendement est en effet deux fois plus élevé en moyenne une année sur deux. L'analyse statistique du potentiel de printemps de chacune des années confirme l'absence de biais dans les zones d'essais les deux années (absence de différence significative [Ferti : n.s., DoseN : n.s., Ferti x DoseN : n.s.]) (Figure 12), ce qui était requis pour tester les différentes régies de fertilisation. En automne de chaque saison, afin de pouvoir calculer le taux d'atteinte du potentiel de rendement, celui-ci a de nouveau été mesuré dans les quadrats de récolte. Les potentiels moyens mesurés pour 2021 et 2022 sont dans les intervalles de ceux mesurés au printemps (2021 : 39 863 lb ac^{-1}, 2022 : 21 270 lb ac^{-1}), avec un potentiel 1,9 fois plus grand en 2021 qu'en 2022.

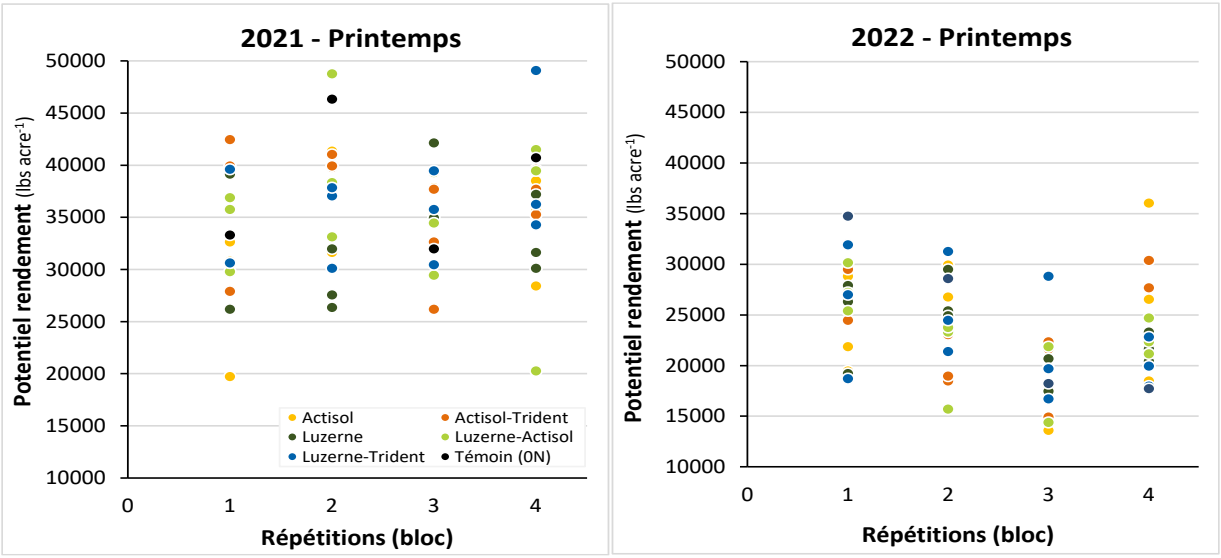


Figure 12. Potentiel de rendement de printemps des parcelles à l'étude avant fertilisation, 2021 (8 juin) et 2022 (17 juin).

3.2.2.2 Taux de nouaison (automne)

Le taux de nouaison, indiquant le pourcentage de fleurs ayant formé des fruits, a été calculé au stade *récolte* les deux années. Ce pourcentage a été significativement affecté par les régies de fertilisation puisque la demande en N est importante pendant la période de nouaison (Davenport et coll. 2000) (Figure 13). Il en ressort globalement que hausser les apports de N ont permis d'augmenter linéairement le taux de nouaison, mais l'effet est plus grand avec les régies d'EO présentant un plus grand potentiel de minéralisation du N_{org} (interaction Ferti x Dose à P = 0,0024). Ainsi, les régies Actisol et Actisol-T se démarquent, avec une hausse de 1,5 x du pourcentage de fleurs ayant formé des fruits (75N vs. Témoin 0N). En second rang, viennent les régies Luzerne-A et Luzerne-T, avec une hausse de 1,23 fois (75N vs. Témoin 0N). Enfin, la régie Luzerne seule n'a pas permis d'augmenter linéairement le taux de nouaison de façon significative, ce qui était attendu étant donné le faible taux de minéralisation du N_{org} mesuré lors des incubations, démontrant que ce produit est peu réactif (4 %, P = n.s.). L'emploi d'Actisol comme intrant majoritaire dans la régie (Actisol et Actisol-T) a donc permis la nouaison de 20 % plus de fleurs que les régies Luzerne-A et Luzerne-T, ce qui touche directement les rendements vendables, qui sont effectivement 2 à 27 % plus élevés pour les régies Actisol et Actisol-T, en comparaison des régies Luzerne-A et Luzerne-T. Il est également pertinent d'analyser les régies par comparaison de moyennes (ANOVA sur les ROM, Figure 14) puisque les courbes ne sont pas

comparées entre elles statistiquement avec les régressions linéaires. Sur la base des travaux de Jamaly (2017), rapportant des taux de 40-46 %, sur deux années de suite pour la variété Stevens, lorsqu'une fertilisation minérale de 45 kg N ha^{-1} était appliquée, contre des taux de nouaison de 33-37 % en absence de fertilisation N (0N), il appert que ce sont principalement les régies Actisol et Actisol-T qui permettent de produire des taux au-dessus de 40 % (taux moy. 43,4 % aux doses de 50N et 75N). Les trois autres régies à base de Luzerne présentent quant à elles des taux statistiquement égaux moyens de 35 % aux doses de 50N et 75N, ce qui se situe dans l'intervalle des taux des sols non fertilisés de l'étude de Jamaly (2017).

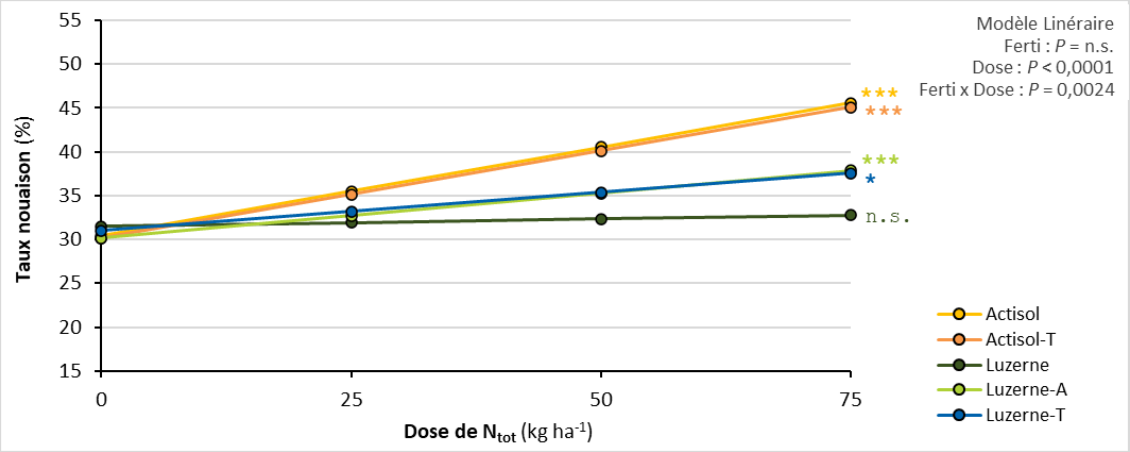


Figure 13. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le taux de nouaison en fin de saison selon les régies de fertilisation, années 2021 et 2022 combinées. Valeurs prédites du modèle. Niveaux de signification de l'effet linéaire de chacune des courbes : non significatif = n.s., $P < 0,05$ = *, $P < 0,01$= **, $P < 0,001$= ***, tendances ($0,05 \leq P \leq 0,10$) = indiquées en nombre.

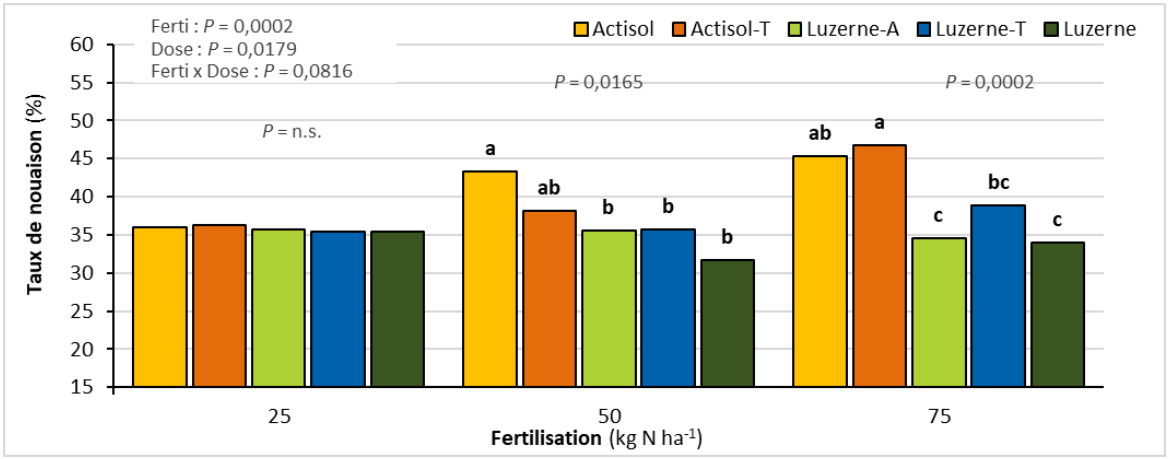


Figure 14. Taux de nouaison en fin de saison selon la dose d'apport d'azote et le type de fertilisant, années 2021 et 2022 combinées. ANOVA sur les ROM. Moyennes calculées (ROM*Témoin T0). Témoin : 30,4 %. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$. La présentation de l'interaction a été jugée pertinente bien que le seuil de signification soit au niveau de la tendance $P = 0,0816$ considérant la difficulté d'échantillonner de grandes superficies dans cette culture ce qui hausse la variabilité des résultats.

3.2.2.3 Rendements en fruits l'année de la fertilisation

Les rendements produits dans les aires des dispositifs d'étude de 2021 et 2022 sont élevés au regard des rendements provinciaux du secteur biologique, lesquels sont de 15 482 et 18 145 lb ac^{-1} en 2021 et 2022, respectivement (APCQ 2024). Le fait que les fruits soient récoltés à la main sur une superficie réduite peut contribuer à augmenter les rendements en évitant certaines pertes. Le producteur a tout de même été questionné sur les rendements obtenus à l'échelle du champ (2021 : 41 447 lb ac^{-1}; 2022 : 16 888 lb ac^{-1}) et ceux-ci se sont avérés du même ordre de grandeur que les rendements des dispositifs les deux années. De plus, le CETAQ, qui mesurait également les rendements dans les dispositifs 2021 et 2022, est arrivé au même niveau de productivité. À cela s'ajoute des taux de déclassement à la récolte qui se sont avérés très faibles (moyenne de 1,1 %). Il est intéressant de constater que ceux-ci n'ont pas été augmentés avec l'accroissement de la dose

d'apport de N (Effet Dose N : *P* = n.s.). Les taux étaient toutefois différents selon le type de fertilisant (Effet Ferti : *P* = 0,0198, F x D : *P* = n.s.), mais les valeurs demeuraient très faibles pour tous (0,7-1,6 %) au moment de la récolte manuelle (dans le cadre de cette étude, la qualité après entreposage n'a pas été investiguée). Le taux de déclassement moyen pour l'Actisol et l'Actisol-T était de 1,24 %, en comparaison de 0,92 % pour les autres régies. Cette différence, bien que significative en termes statistiques, demeure faible en termes de quantité de fruits, soit un déclassement moyen de 407 lb ac^{-1} (Actisol et Actisol-T), en comparaison de 240 lb ac^{-1} pour les régies avec Luzerne (Luzerne-A, Luzerne-T et Luzerne-seule). Les régies Actisol et Actisol-T conservent donc des rendements vendables supérieurs, en comparaison des régies avec Luzerne (Figure 16).

La fertilisation a haussé de façon linéaire tant les rendements totaux (Figure 15) que vendables (Figure 16), exceptée ceux de la régie avec Luzerne seule (*P* = n.s.). Les régies Actisol et Actisol-T se détachent des autres régies, avec une hausse de rendements de 1,48 x (75N vs. Témoin 0N), ce qui correspond également à la hausse du taux de nouaison en fin de saison. La combinaison Actisol-T s'avère donc aussi efficace à produire des rendements tout en permettant de réduire de 25 % les apports d'Actisol qui contrib davantage que le Trident à l'enrichissement du sol en P. Suivent les régies Luzerne-T et Luzerne-A avec une hausse du rendement de 1,18 x (75N vs. Témoin 0N). En termes de lb ac^{-1}, à la dose de 75N, soutenant la plus forte production de fruits, les régies Actisol 75N et Actisol-T 75N ont permis de produire 38 586 lb ac^{-1} de fruits vendables, soit 14 438 lb ac^{-1} de plus que le Témoin 0N et 8 627 lb ac^{-1} de plus que les régies Luzerne-A 75N et Luzerne-T 75N (Figure 17). De plus, seules les régies Actisol et Actisol-Trident apportant au minimum 50 kg N_{tot} ha^{-1} ont permis d'atteindre autour des 100 % de potentiel de rendement (97-107 %), calculé selon le décompte des tiges productives par unité de surface, tandis que les autres régies ont plafonné à 80 % (Figure 18, Figure 19). L'apport de Luzerne en quantités plus importante (75N) a même fortement abaissé le taux d'atteinte du potentiel à 61 %.

Sur les entreprises, un apport entre 30-45 kg N_{eff} ha^{-1} (27-40 lb N_{eff} ac^{-1}) est recommandé (CRAAQ 2010, Hart et coll. 2015) pour la production de la canneberge, ce qui représente avec un coefficient d'efficacité du N_{org} de 70 % un apport de 43-64 kg N_{tot} ha^{-1} afin d'atteindre un optimal entre le rendement et la qualité des fruits. Cet intervalle de doses se situe sous la dose maximale de 75N testée dans cette étude, laquelle donne les meilleurs rendements vendables sans pertes importantes de qualité au moment de la récolte (non testé après entreposage). De plus, aucun plafonnement des rendements n'a été mesuré (effets linéaires; aucune effet quadratique). Ces résultats appuient la pertinence en contexte de fertilisation organique de conduire davantage d'essais de fertilisation, d'autant plus que les analyses foliaires de fin de saison indiquent des teneurs égales ou sous la limite inférieure critique pour toutes les régies malgré une gestion rigoureuse par l'entreprise des apports annuels de fertilisants. Dans de tels essais, la mesure de la qualité en entreposage serait à inclure. En effet, il se pourrait que la dose de 75N, qui performe bien dans cette étude, provoque à long terme un arrière-effet entraînant une baisse de qualité des fruits entreposés ou une croissance végétative excessive en champ des plants. Surtout considérant que ce projet démontre que les doses de 50N et 75N appliquées en 2021 ont eu un arrière-effet notable sur le potentiel de rendement et le rendement vendable récolté du dispositif 2021 en 2022 (voir section 3.2.2.4 *Arrière-effet de la fertilisation*).

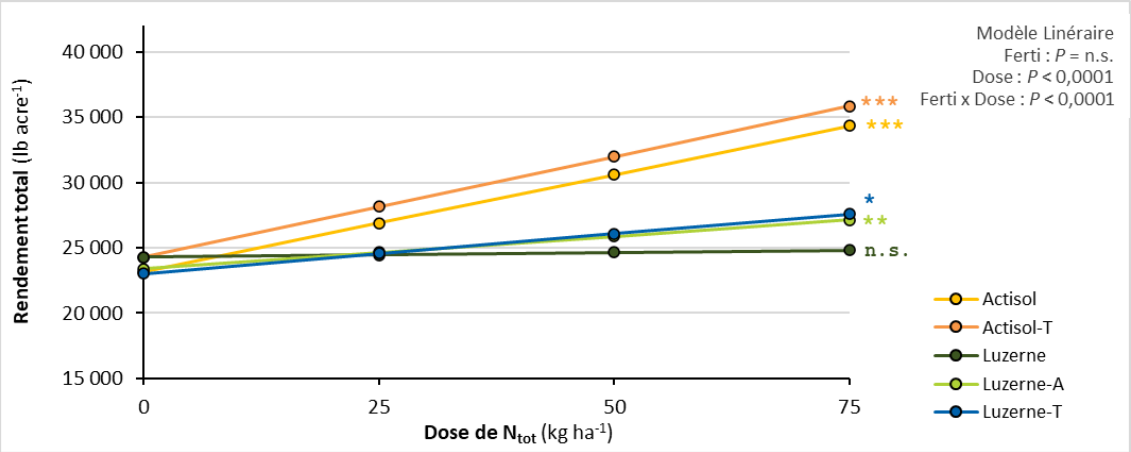


Figure 15. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le rendement total selon les régies de fertilisation, années 2021 et 2022 combinées. Valeurs prédites du modèle. Niveaux de signification de l'effet linéaire de chacune des courbes : non significatif = n.s., *P* < 0,05 = *, *P* < 0,01= **, *P* < 0,001= ***, tendances (0,05 ≤ *P* ≤ 0,10) = indiquées en nombre.

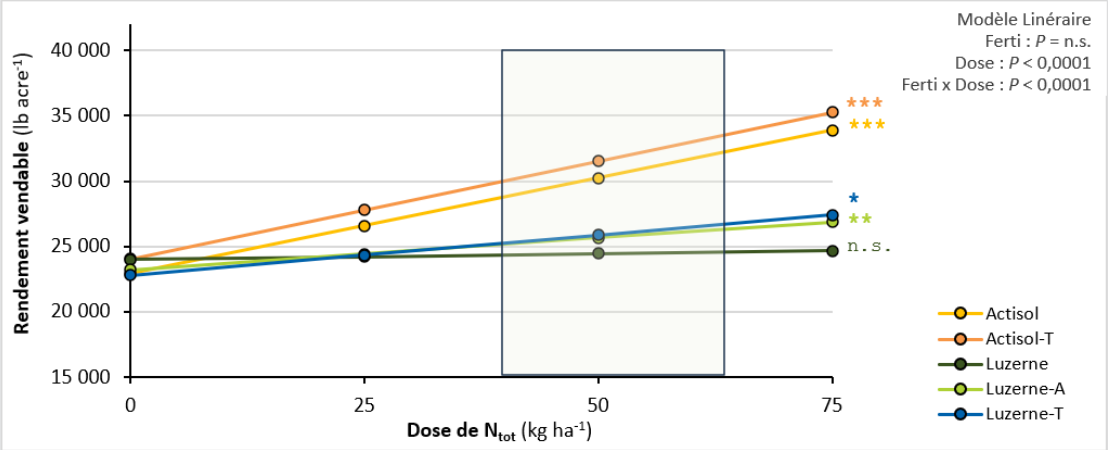


Figure 16. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le rendement vendable selon les régies de fertilisation, années 2021 et 2022 combinées. Valeurs prédites du modèle. Niveaux de signification de l'effet linéaire de chacune des courbes : non significatif = n.s., $P < 0,05$ = *, $P < 0,01$= **, $P < 0,001$= ***, tendances ($0,05 \leq P \leq 0,10$) = indiquées en nombre. La dose usuelle producteur se situe entre 43-64 kg N_{tot} ha^{-1} afin d'approcher un 30- 45 kg N_{eff} ha^{-1} (27-40 lb N_{eff} ac^{-1}) considérant un coefficient d'efficacité du N_{org} d'environ 70 % (carré vert).

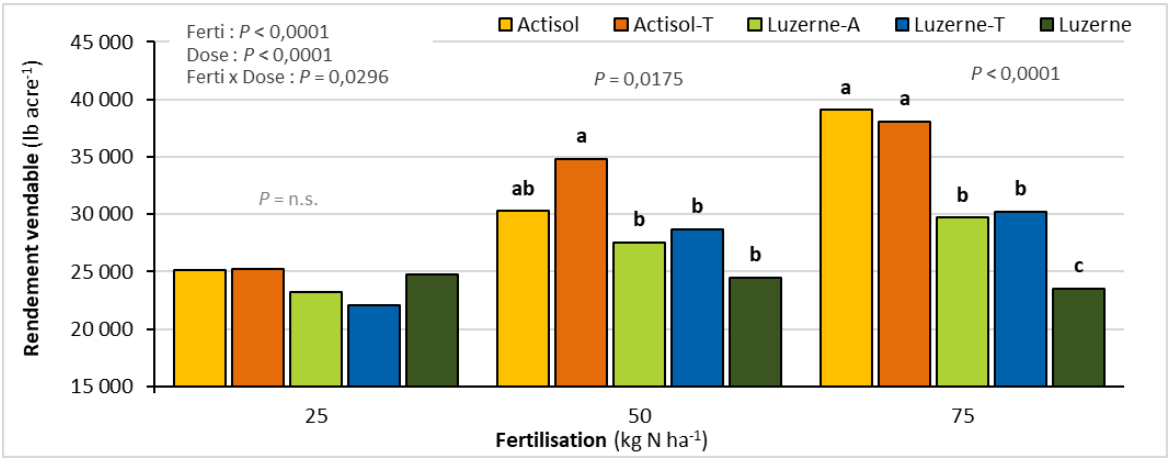


Figure 17. Rendement vendable selon la dose d'apport d'azote et le type de fertilisant, années 2021 et 2022 combinées. ANOVA sur les ROM. Moyennes calculées (ROM*Témoin T0). Témoin : 24 148 lb ac^{-1}. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$.

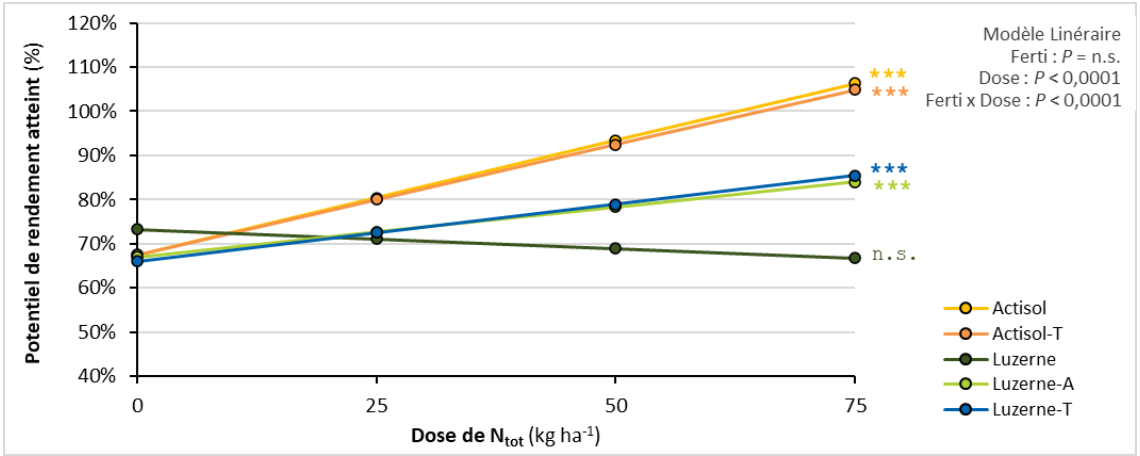


Figure 18. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le potentiel de rendement atteint selon la régie de fertilisation, années 2021 et 2022 combinées. Valeurs prédites du modèle. Niveaux de signification de l'effet linéaire de chacune des courbes : non significatif = n.s., $P < 0,05$ = *, $P < 0,01$= **, $P < 0,001$= ***, tendances ($0,05 \leq P \leq 0,10$) = indiquées en nombre.

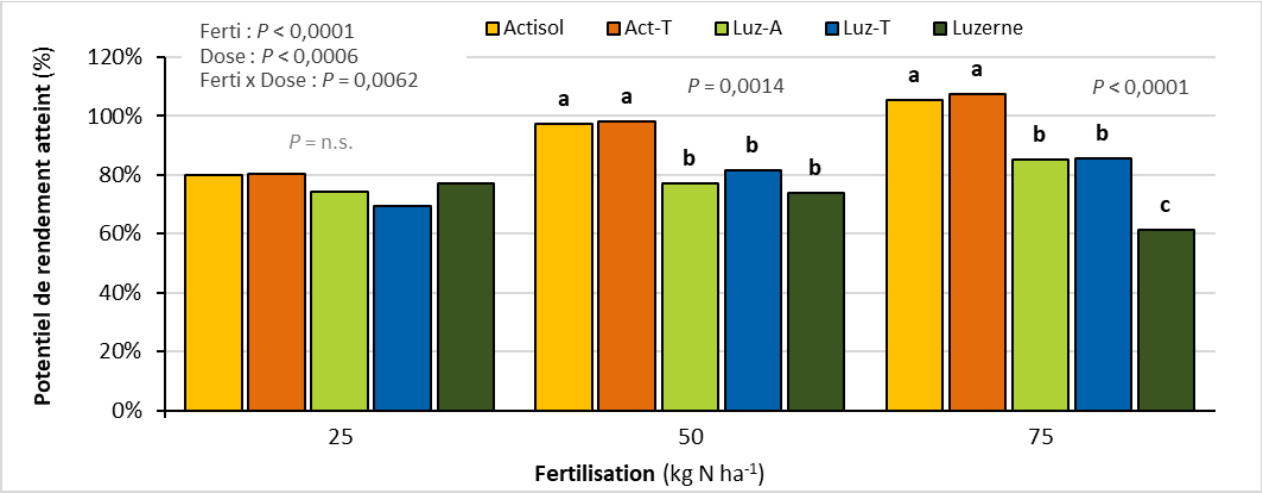


Figure 19. Potentiel de rendement atteint selon la dose d'apport d'azote et le type de fertilisant, années 2021 et 2022 combinées. ANOVA sur les ROM. Moyennes calculées (ROM*Témoin T0). Témoin : 68 %. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$.

3.2.2.4 Arrière-effet de la fertilisation sur les Rendements en fruits l'année de l'année suivante

Il a été décidé en cours de projet d'ajouter la mesure de l'arrière-effet de la fertilisation de la saison 2021 sur le rendement 2022 dans le dispositif de 2021 étant donné que les plantes pérennes comme la canneberge emmagasinent les nutriments dans leurs racines et leurs tiges. En effet, il a été estimé que pendant une saison, 50 % de l'azote appliqué pouvait être retrouvé dans les vieilles tiges et les racines. L'année suivante, 30 % de cet azote peut être relocalisé vers les pousses annuelles et la production de fruits (Hart et coll. 2015). Ainsi, il ressort que le potentiel de rendement (Figure 20) ainsi que le rendement vendable produit (Figure 21) de 2022 ont été significativement modifiés par la fertilisation de l'année précédente (2021). En rappel, au printemps 2022, toutes les parcelles du dispo de 2021 ont reçu 63 kg N_{tot} ha^{-1} sous forme de Actisol (57N)-Trident (6N). Les différences de potentiels et de rendements ont été très importantes selon la dose d'apport de N de 2021, mais aussi selon le type d'engrais, probablement parce que ceux-ci, indirectement, ne présentent pas le même potentiel azoté pour une même quantité de N_{tot} apportée par surface. Ainsi, les parcelles moins fertilisées en 2021 ayant reçu 25N et 50N ont produit, respectivement, 5 135 et 11 648 lb ac^{-1} de fruits vendables de moins que celles qui avaient reçu 75N. Considérant qu'au printemps 2022 toutes les parcelles avaient reçu une dose de 63N, il s'agit d'un fort arrière-effet qui démontre l'importance d'une gestion rigoureuse de la fertilisation d'une saison à l'autre. Un rendement autour de 30 000 lb ac^{-1} représente en effet un gain de 6 000 $ ac^{-1} (ex. @ 0,60 $ lb^{-1}, prix 2024) par rapport à une rendement de 20 000 lb ac^{-1}. À noter, tel que mentionné précédemment, que la qualité n'a pu être mesurée sur cette récolte additionnelle, et que vu l'arrière-effet généré par la dose de 75N sur le rendement, il ne peut être exclu que l'apport répété d'une forte dose de N (75N) pourrait entraîner une diminution des paramètres de qualité tel que le degré Brix ou le Tacy.

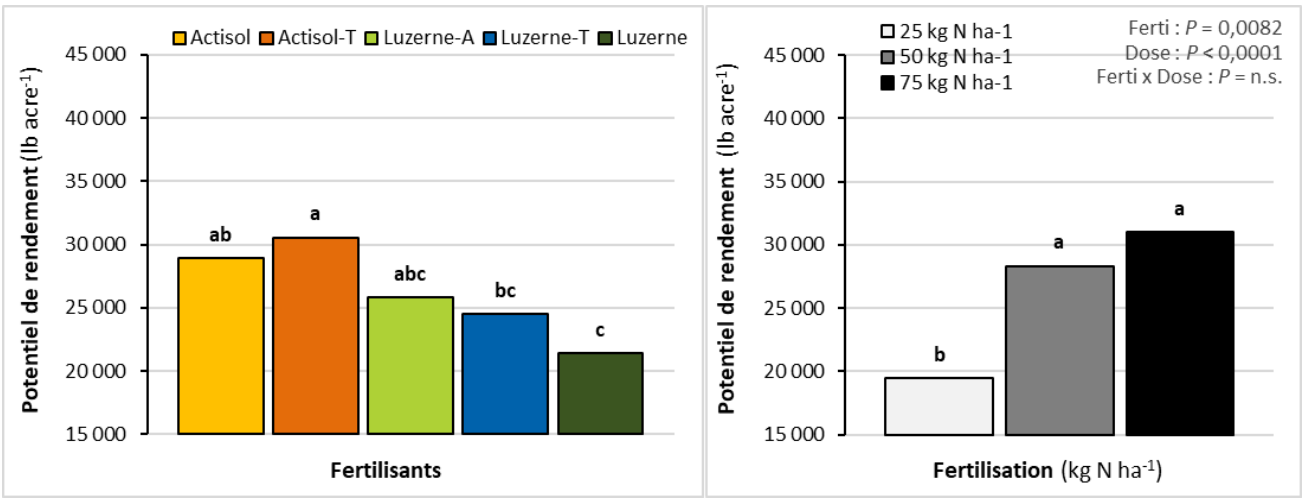


Figure 20. Potentiel de rendement en fruits du dispositif de 2021 pour la saison 2022 selon la fertilisation du printemps 2021 (arrière-effet fertilisants et doses N 2021). ANOVA sur les ROM. Moyennes calculées (ROM*Témoin T0). Témoin : 13 775 lb ac^{-1}. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$.

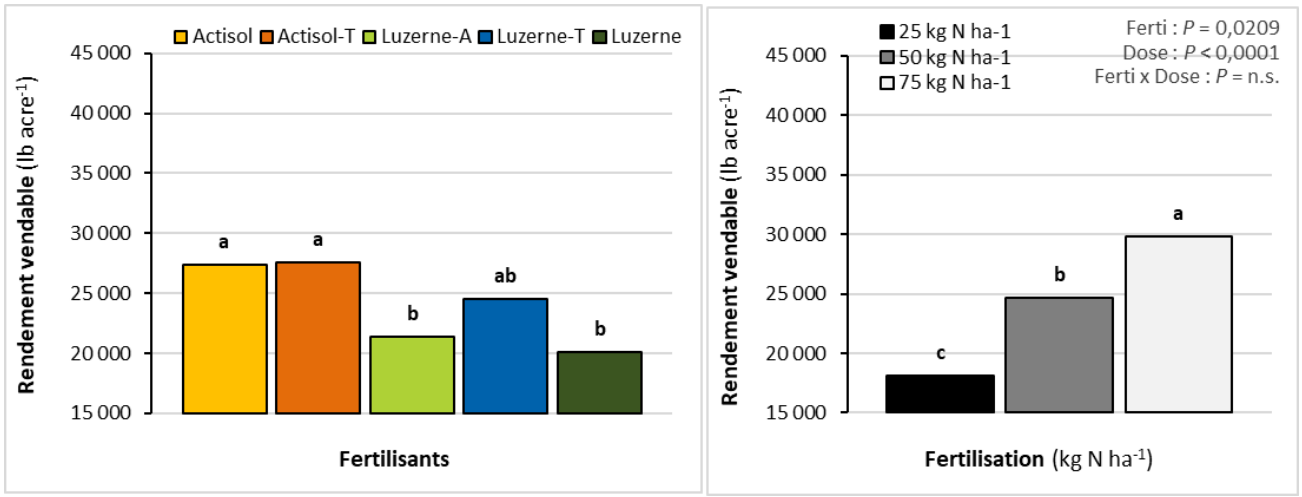


Figure 21. Rendement vendable de 2022 selon la régie de fertilisation de 2021. ANOVA sur les ROM. Moyennes calculées (ROM*Témoin T0). Témoin : 13 543 lb ac^{-1}. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$.

3.2.2.5 Qualité des fruits

La qualité des fruits est un critère de vente important de la canneberge, reconnue pour ses propriétés nutritives et nutraceutiques. L'évaluation réalisée par le CETAQ démontre que tous les critères ciblés ont été influencés soit par le type de fertilisant (calibre, fermeté), la dose de N (acidité, Tacy) ou les deux facteurs (nombre de fruits, degré Brix). Ces effets étaient attendus, considérant les différents rendements produits selon les régies de fertilisation. Pour l'ensemble des critères de qualité, les effets restent cependant mineurs et ne diminuent pas la valeur du produit.

L'impact des régies de fertilisation sur le calibre a été faible (Figure 22). Le calibre tend à être similaire dans toutes les régies et demeure près de la valeur attendue de 1,5 g pour le cultivar Stevens. Les régies contenant de la luzerne tendent à produire des fruits légèrement moins gros, mais la différence est de moins de 0,1 g par fruit. Bien qu'il existe une relation inverse reconnue entre le calibre des fruits et le nombre de fruits récoltés, indiquant que lorsque davantage de fruits sont produits ceux-ci sont de masse inférieure, la baisse de calibre de ces régies suggère davantage un déficit en N puisque ces régies ont également produit significativement moins de fruits (Figure 23). Ainsi, les hausses marquées de rendements des régies Actisol et Actisol-T (Figure 17) reposent sur la production d'un plus grand nombre de fruits présentant le calibre attendu. En effet, les plants des régies Actisol et Actisol-T ont produit en moyenne 13,2 M de fruits ac^{-1} (Ferti : $P = 0,0047$), en comparaison de 11,7 M de fruits ac^{-1}, en moyenne, pour les trois autres régies avec luzerne (Figure 23). Cela représente

1,5 M ac^{-1} de fruits de plus, sans que cela affecte leur fermeté à la récolte (fermeté après entreposage à valider) qui demeure excellente même si elle est légèrement inférieure pour les régies Actisol et Actisol-T (Ferti : P = 0,0026, Dose : P = n.s., F x D : P = n.s.) (Figure 24). En effet, les fruits des régies Actisol et Actisol-T présentent une fermeté moyenne de 905 g-force mm^{-1} (FirmTech1), ce qui est au-delà de l'intervalle 800 à 900 g-force mm^{-1} considéré comme étant une très bonne fermeté. Cette valeur est donc loin de l'intervalle de mauvaise fermeté qui est de l'ordre de 400-500 g-force mm^{-1}. La disponibilité accrue en N des EO Actisol et Trident à la dose de 75N n'a donc pas eu d'effet négatif sur la fermeté, qui est reconnue pour diminuer en présence d'excès de N. Cela dit, il est rare que des fruits récoltés à la main montrent une mauvaise fermeté puisque c'est l'aspiration dans la pompe à fruit et le transport qui vont rendre les fruits moins fermes. L'effet du type de fertilisant tant sur le calibre et la fermeté est probablement en lien avec le potentiel de fourniture en N plus élevé et plus rapide des EO Actisol et Trident, en comparaison de l'EO Luzerne, tel que discuté préalablement pour les variables de rendement. D'ailleurs, la dose de N a aussi modifié fortement (P < 0,0001) le nombre de fruits produits. Aux doses de 50N et 75N, les plants ont produit en moyenne 12,9 M fruits ac^{-1}, comparativement à 11,1 M fruits ac^{-1} à la dose de 25N.

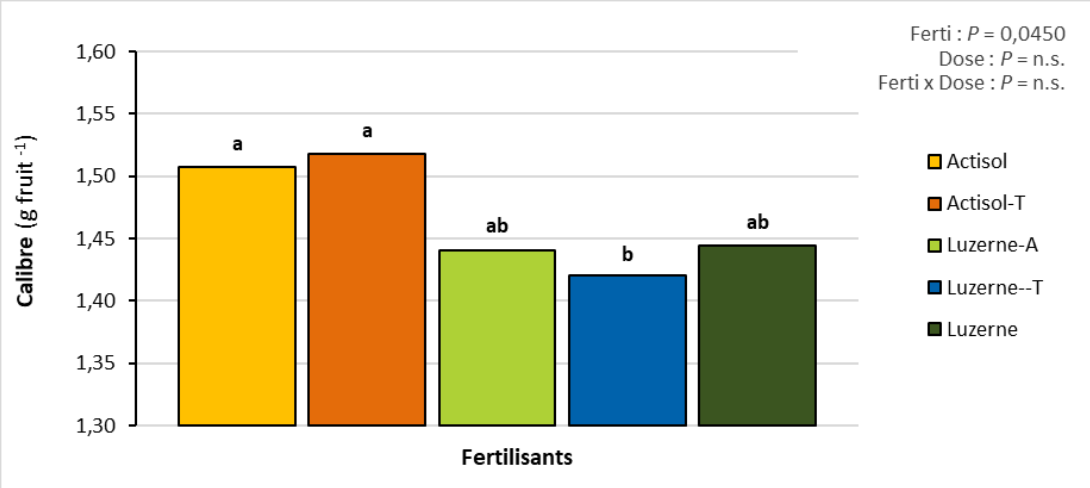


Figure 22. Calibre des fruits (rendement total) selon le type de fertilisant, saison 2021. ANOVA sur les ROM. Moyennes calculées (ROM*Témoin T0). Témoin : 1,46 g fruit^{-1}. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de P < 0,05.

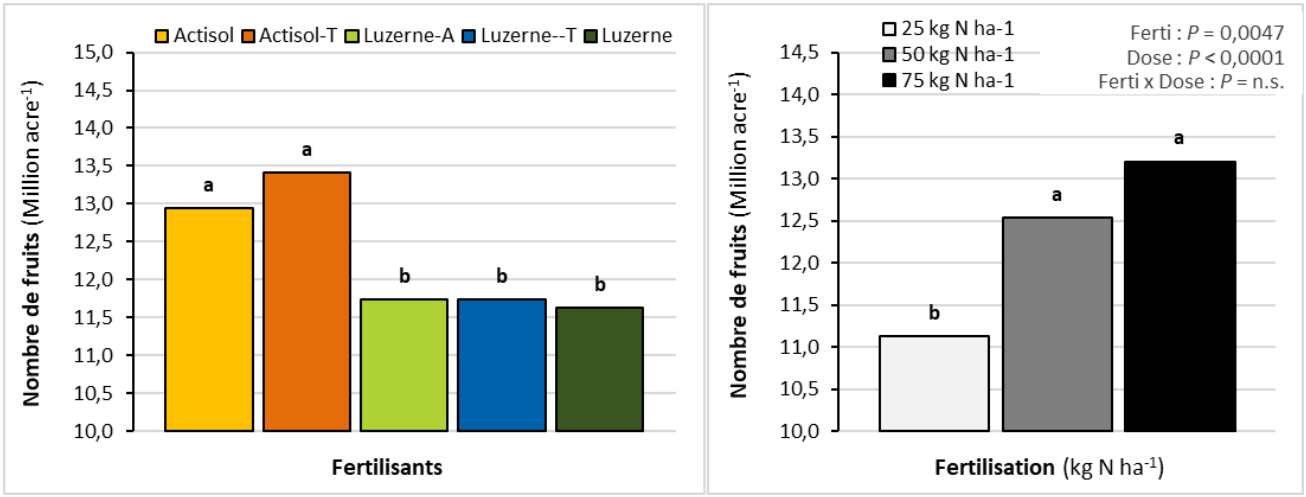


Figure 23. Nombre de fruits produits selon le type de fertilisant et la dose d'apport de N, saison 2021. ANOVA sur les ROM. Moyennes calculées (ROM*Témoin T0). Témoin : 11,27 M fruits ac^{-1}. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de P < 0,05.

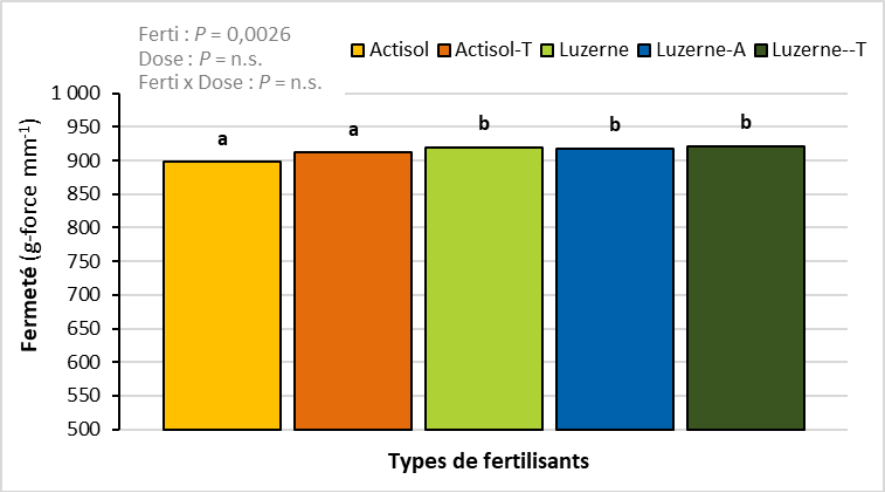


Figure 24. Fermeté des fruits à la récolte (manuelle) selon la dose d'apport d'azote et le type de fertilisant, années 2021 et 2022 combinées. ANOVA sur les ROM. Moyennes calculées (ROM*Témoin T0). Témoin : 909,8 g-force mm^{-1}. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$.

Il est pertinent de se demander si la production de millions de fruits supplémentaires à partir d'un nombre similaire de tiges à l'acre peut entraîner des modifications sur les critères nutraceutiques et de goût des canneberges. Il s'avère qu'effectivement, l'acidité (Figure 25), le taux de sucres dissous (degré Brix; Figure 26; Figure 27) et le contenu en anthocyanes (Tacy) (Figure 28) ont été modifiés à la baisse, surtout par la dose d'apport de N. Toutefois, l'ensemble des effets demeurent mineurs. L'impact linéaire de la fertilisation azotée sur l'acidité, bien que statistiquement significative ($P \leq 0,0001$), est trop faible pour modifier la qualité des fruits avec 0,1 g 100 g^{-1} de différence entre les fruits du Témoin 0N et ceux fertilisés à la plus forte dose de 75N. De surcroit, ce critère est délaissé par les grandes compagnies. Dans le cas des degrés Brix qui reflètent le goût sucré des fruits, il est reconnu que la hausse des apports en N diminue ce critère. Les résultats de cette étude vont en ce sens. La hausse du N abaisse linéairement les degrés Brix en interaction avec le type de fertilisant (Ferti : $P \leq 0,0001$, Dose : $P \leq 0,0001$, F x D : $P = 0,0008$; Figure 26). En lien avec les résultats précédents, ce sont principalement les fruits produits avec les régies Actisol et Actisol-Trident qui voient leur taux de sucre diminuer. La différence n'est cependant que d'environ 1° Brix entre les fruits du Témoin 0N et ceux de la régie 75N Actisol et Actisol-T et toutes les régies sont dans l'interval recherché par l'industrie (ex. Fruit d'Or; canneberges congelées, USDA Grade A). Enfin, le contenu en anthocyanes (Tacy), qui est un critère majeur de qualité, est aussi abaissé linéairement avec l'accroissement des doses de N, sans influence du type de fertilisants (Ferti : P = n.s., Dose : $P \leq 0,0001$, Ferti x Dose : P = n.s.). Comme les anthocyanes sont principalement concentrées dans les couches épidermiques du fruit (Sapers et coll 1983), cela explique que plus le fruit grossit, plus les contenus en Tacy diminuent (Vorsa et Welker 1985). Tel que pour les autres critères, la baisse est toutefois mineure. La teneur en anthocyanes passe de 34,2 à 31,2 mg A. 100 g^{-1}, soit une diminution d'environ 10 %. Ainsi, dans l'ensemble, le Tacy est dans la limite inférieure des concentrations recherchées qui doivent se situer entre 35-50 mg A. 100 g^{-1} (Serres 2017). Ce critère, jumelé à la réponse linéaire au N pour les rendements vendables (voir section 3.2.2.3) et aux analyses foliaires globalement sous la valeur critique renforce la pertinence énoncée dans la section des rendements (voir section 3.2.2.3) de conduire des essais sur la fertilisation azotée organique en production biologique de canneberge pour mieux comprendre la fourniture en N des produits et les doses à appliquer pour obtenir un rendement optimal.

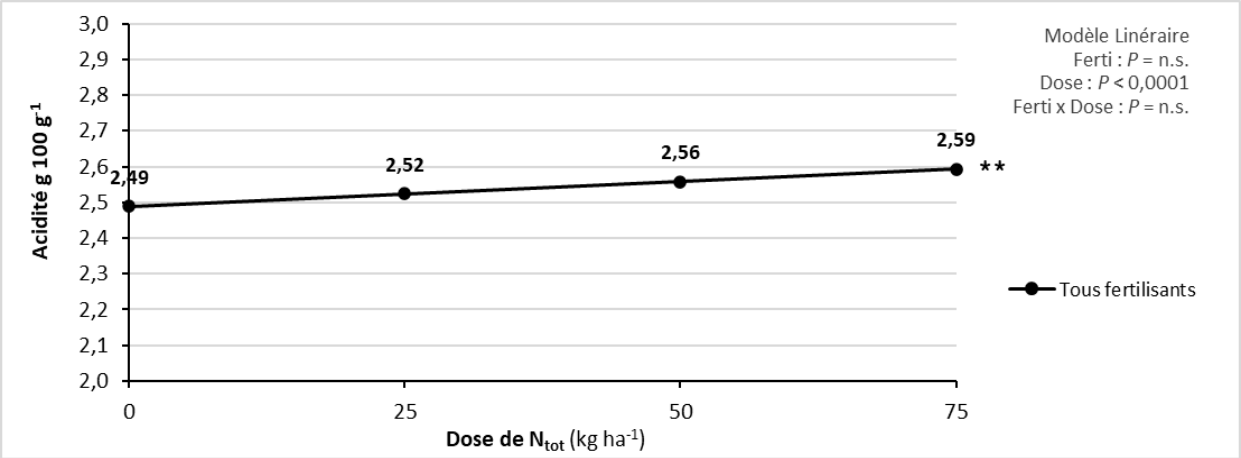


Figure 25. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur l'acidité des fruits, années 2021 et 2022 combinées. Valeurs prédites du modèle. Niveaux de signification de l'effet linéaire de chacune des courbes : non significatif = n.s., $P < 0,05$ = *, $P < 0,01$= **, $P < 0,001$= ***, tendances ($0,05 \leq P \leq 0,10$) = indiquées en nombre.

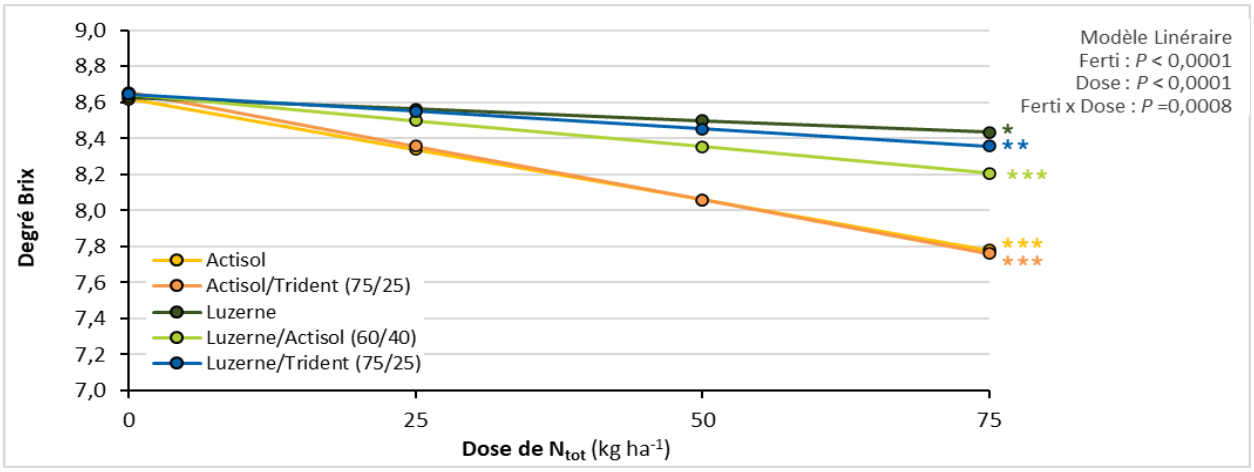


Figure 26. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le degré Brix des fruits, années 2021 et 2022 combinées. Valeurs prédites du modèle. Niveaux de signification de l'effet linéaire de chacune des courbes : non significatif = n.s., $P < 0,05$ = *, $P < 0,01$= **, $P < 0,001$= ***, tendances ($0,05 \leq P \leq 0,10$) = indiquées en nombre.

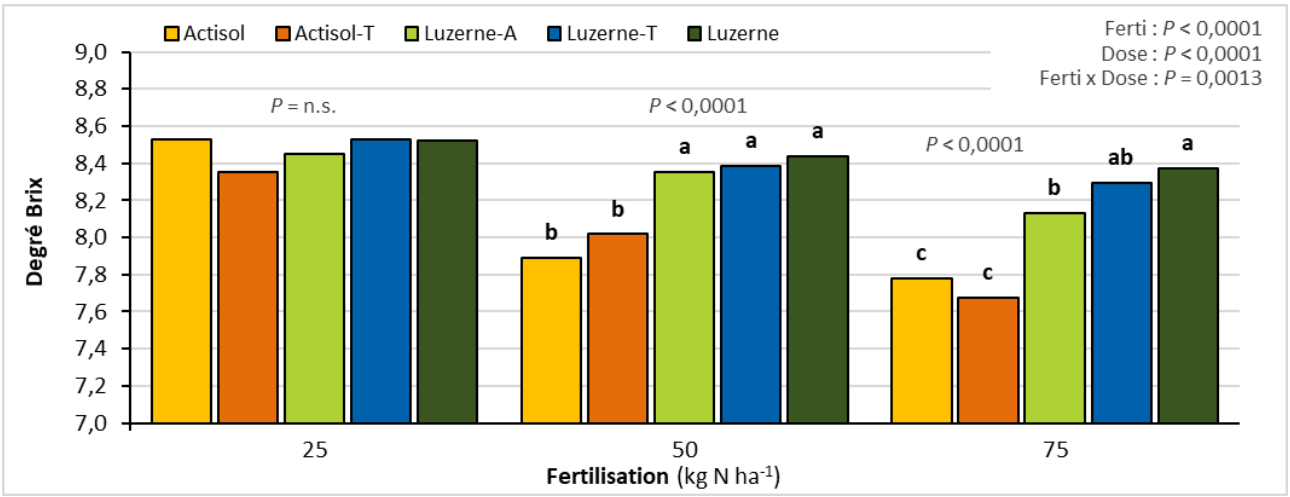


Figure 27. Sucrosité (degré Brix) des fruits selon la dose d'apport d'azote et le type de fertilisant, années 2021 et 2022 combinées. ANOVA sur les ROM. Moyennes calculées (ROM*Témoin T0). Témoin : 8,56 %. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$.

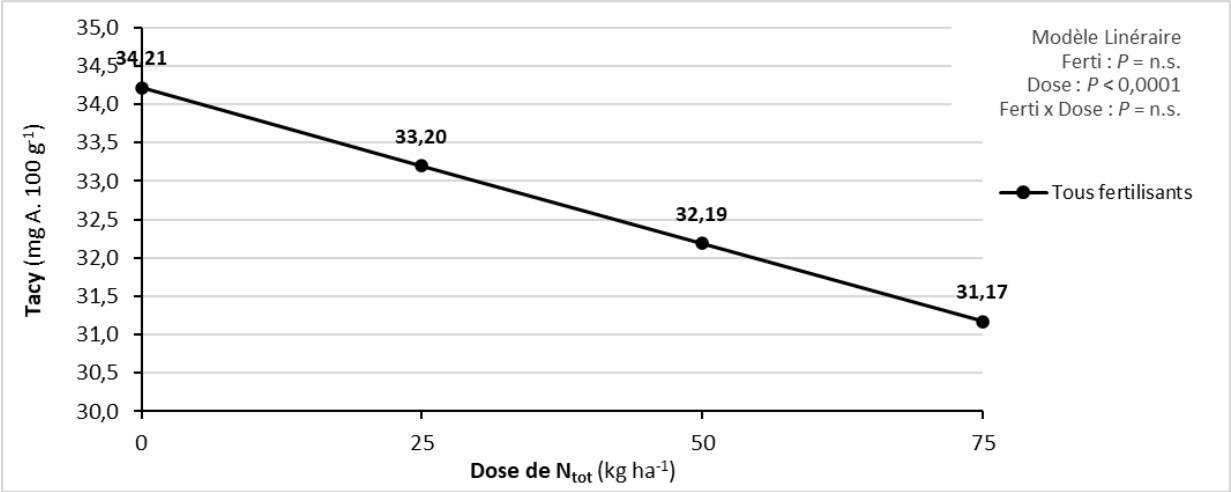


Figure 28. Effet linéaire la dose d'apport d'azote sur le contenu en anthocyanes (TACY) des fruits, années 2021 et 2022 combinées. Valeurs prédites du modèle. Niveaux de signification de l'effet linéaire de chacune des courbes : non significatif = n.s., $P < 0,05$ = *, $P < 0,01$= **, $P < 0,001$= ***, tendances ($0.05 \geq P \leq 0,10$) = indiquées en nombre.

3.2.3 Nutrition

3.2.3.1 Analyses foliaires

Les analyses foliaires ((pousses annuelles (feuilles + tige)), réalisées en septembre, renseigne sur le statut nutritionnel des plants de canneberges et permettent de vérifier si la fertilisation doit être ajustée lors de la saison suivante. Selon différents ouvrages de la littérature (Tableau 13), la teneur de N doit se situer entre 0,9 et 1,24 %. Au Québec, les seuils de 0,9 - 1,1 % N sont le plus souvent utilisés (Labarre et coll. 2022). Ainsi, dans le cadre de l'étude, la quasi-totalité des teneurs foliaires sont sous le seuil minimal critique de toutes les sources consultées, malgré un apport atteignant jusqu'à 75 kg N_{tot} ha^{-1}, ce qui est plus élevé que la dose de référence se situant entre 43-64 kg N_{tot} ha^{-1} (CRAAQ 2010, Hart et coll. 2015). Ainsi, tel que mentionné précédemment, puisque qu'aucun plafonnement des rendements vendables n'a été mesuré en fonction de la dose de N apporté, que la qualité à la récolte s'est maintenue l'année d'application et que les gains de rendements vendables en arrière-effet ont été importants, il serait pertinent de poursuivre la réflexion sur les doses recommandées en fertilisation biologique dans un contexte de forte production, telle que celle enregistrée dans le champ à l'étude.

Tableau 13. Intervalle de teneur en azote foliaire des plants de canneberge selon différentes sources publiées[1]

	Intervalle de suffisance (%)			
Éléments	Roper 2001 (Wisconsin)	Yarborough et coll. 1993 (Maine)	Marchand et coll. 2013 (Québec)	Québec (2014-2015)
Azote (N)	0,90 – 1,10	0,95 – 1,05	1,09 – 1,24	1,03 – 1,07
Phosphore (P)	0,10 – 0,20	0,11 – 0,14	0,11 – 0,13	0,09 – 0,10
Potassium (K)	0,40 – 0,75	0,40 – 0,65	0,50 – 0,56	0,48 – 0,51
Calcium (Ca)	0,30 – 0,80	0,60 – 0,80	0,84 – 1,00	0,81 – 0,86
Magnésium (Mg)	0,15 – 0,25	0,20 – 0,25	0,17 – 0,20	0,19 – 0,21
Soufre (S)	0,08 – 0,25	ND	ND	0,08 – 0,09

[1]Valeurs tirées de Painchaud, 2017.

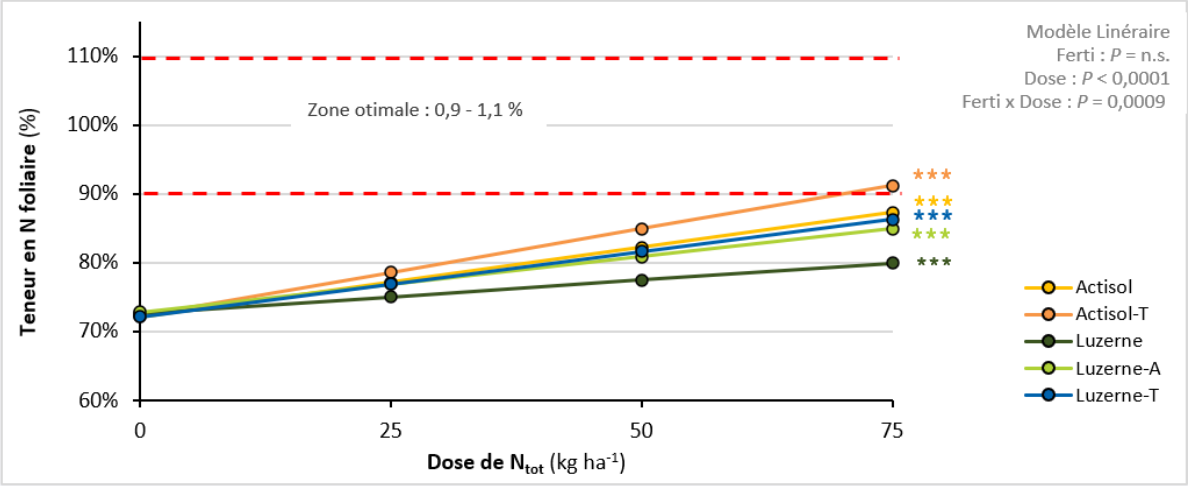


Figure 29. Effet linéaire du type de fertilisant et de la dose d'apport d'azote sur la teneur foliaire en azote (tige annuelle + feuilles), années 2021 et 2022 combinées. Valeurs prédites du modèle. Niveaux de signification de l'effet linéaire de chacune des courbes : non significatif = n.s., $P < 0,05$ = *, $P < 0,01$= **, $P < 0,001$= ***, tendances ($0.05 \geq P \leq 0,10$) = indiquées en nombre.

3.2.3.2 Exportations d'azote hors du site de production par la récolte

En présence de hauts rendements, les exportations d'azote hors du site de production par la récolte se situent entre 10,4 et 18,4 kg N_{tot} ha^{-1} (Tableau 14). Les exportations du Témoin 0N renseigne sur le N disponible provenant des réserves de la plante (portion de fertilisation de l'année précédente) et de la capacité du sol du site à fournir du N. Dans cette étude, 10,4 kg N_{tot} ha^{-1} ont été exporté dans la régie Témoin (0N), ce qui représente entre 56- 98 % du N exporté par les fruits produits dans les régies avec apport de N. Ces valeurs d'exportations sont sous les doses de recommandées d'apport (43-64 kg N_{tot} ha^{-1} (CRAAQ 2010, Hart et coll. 2015)), ce qui est attendu puisque le sol peut fournir une partie et que les EO doivent être minéralisés et ne présentent pas une efficacité du N de 100 % mais le plus souvent autour de 30- 60 %, rarement plus de 70 % (Chap 10, CRAAQ 2013). Dans le cas précis des EO incubés dans ce projet, en conditions contrôlées, les taux de fourniture de N_{eff} (N_{min}) sur la base 200 kg N_{tot} ha^{-1} apportés ont été de 66 - 92 % et de 47- 58 % pour le Trident et l'Actisol, respectivement. Avec ces taux, un apport de 45 kg N_{min} ha^{-1} avec une régie Actisol-Trident (75/25) demande des applications entre 89 et 79 kg N_{tot} ha^{-1} pour un sol jeune et froid et un sol mature et chaud, respectivement. Ces apports calculés sur les valeurs de minéralisation obtenues en conditions contrôlées sont probablement moindres que ce qui seraient requis en champ (variations de température, d'humidité et facteurs de pertes), ce qui pourrait expliquer que malgré la dose de 75 N_{tot} ha^{-1} appliquée avec ces produits, les rendements n'ont pas plafonné avec ces régies, que les teneurs foliaires étaient sous les seuils critiques et les valeurs de Tacy dans la limite inférieure de ce qui est visé.

Tableau 14. Exportation d'azote selon les régies de fertilisation basée sur la teneur en N des fruits et le rendement total.

Fertilisants	Quantités exportées de N (kg N ha^{-1})							
	Doses de N (kg ha^{-1})				Rendement total (kg ha^{-1})			
	0	25	50	75	0	25	50	75
Témoin	10,4				27 365			
Actisol		12,2	14,5	18,4		28 473	34 334	44 213
Actisol-Trident		12,5	16,0	17,9		28 429	39 547	43 537
Luzerne-Actisol		10,8	12,0	13,9		26 180	31 001	33 486
Luzerne-Trident		10,6	11,9	13,9		25 025	32 359	34 132
Luzerne		11,1	11,9	12,5		28 005	27 581	26 574

3.2.4 Dynamique et contenu en N minéral du sol (0-10 cm) en fonction des régies de fertilisation

3.2.4.1 Membranes d'échanges ioniques (MEI)

Les flux d'ions N-NO_3 et N-NH_4 ont été suivis *in situ* dans la couche utile des sols Témoin (0N) et de ceux recevant 50 kg N_{tot} ha^{-1}. Ce suivi confirme que l'ion ammonium (NH_4^+) est bien celui qui domine. En effet, les flux de nitrate sont restés très faibles sur toute la saison, les deux années d'essais. En comparaison des flux de N-NH_4 qui peuvent atteindre plus de 5 µg cm^{-2} $période^{-1}$, ceux de N-NO_3 présentaient des valeurs maximales de 0,228 (moy. 0,078) et 0,043 (moy. 0,044) µg cm^{-2} $période^{-1}$ en 2021 et 2022, respectivement. Ainsi, bien que la fertilisation ait très significativement influencé les flux de N-NO_3 en 2021 (Engrais : $P = 0{,}0147$, Période : $P < 0{,}0001$, FxP : $P = 0{,}0100$) et 2022 (Engrais : $P = 0{,}0011$, Période : $P < 0{,}0001$, FxP : P = n.s.), ceux-ci ne sont pas présentés. Il a été noté cependant que les flux étaient plus élevés en présence d'Actisol et du combo Actisol-Luzerne, et les plus faibles dans les sols fertilisés avec le Trident, ce qui est attribuable probablement à son application foliaire. Ainsi, bien qu'habituellement la minéralisation du N_{org} se finalise dans les sols agricoles avec la nitrification de l'ion intermédiaire ammonium, nos résultats corroborent les informations de la littérature à l'effet que dans les sols acides des cannebergières, l'activité des bactéries nitrifiantes est fortement inhibée, empêchant la conversion finale vers le nitrate. L'ammonium constitue donc la source déterminante de N disponible à la culture. Dans un essai de fertilisation de la canneberge avec engrais conventionnels au Québec, les flux nitrate des MEI représentaient 23 à 28 % du N minéral capté par les MEI (Boucher 1999). Ceci est plus élevé que dans notre étude, probablement à cause de l'application de N déjà sous forme minérale, mais confirme que les flux de nitrate sont inférieurs à ceux de l'ammonium qui est l'ion prédominant.

Les flux de N-NH_4 ont été significativement modifiés par les régies de fertilisation sur la majorité de la saison. En tout temps, les flux du sol Témoin 0N demeurent très faibles, presque nuls, confirmant la faible fertilité azotée des sols étudiés, déjà mesurée lors de l'incubation. Ceci concorde avec les gains de rendements importants obtenus avec l'application de 50 kg N_{tot} ha^{-1} en comparaison du Témoin (0N). Ainsi, l'effet sur les flux entre les autres régies repose sur la nature des produits testés. Il est intéressant de noter que l'effet du type de fertilisant ne se limite pas que dans les périodes qui suivent les apports fractionnés de ceux-ci, mais s'étend bien au-delà, et perdure jusqu'en août et septembre selon les années. Le choix du fertilisant a donc un impact sur plusieurs périodes importantes du développement et du rendement de la culture. Bien que les apports aient été décalés d'une semaine entre 2021 et 2022, c'est à partir du 4 juillet que les flux les plus importants ont été mesurés (Figure 30). Le sol et la température de l'air s'étant réchauffés, cela a permis d'accroître la minéralisation du N_{org} en NH_4 suivant la première application d'engrais au stade 30-35 % floraison. La floraison et la nouaison s'accélèrent de la fin juin à la mi-juillet, ce qui correspond à la période la plus active des besoins en N. Après le 3^{e} fractionnement de l'engrais au stade 50 % nouaison, les besoins en N diminuent de façon importante jusqu'à la fin août. Par la suite, la plante aura prélevé tous ses besoins en N et favorisera la relocalisation du N dans la plante pour combler ses besoins plutôt que de les prélever dans le sol (Hart et coll 2015). Si les patrons de flux des deux années sont comparés dans le temps, les patrons de 2022 sont décalés vers le mois de septembre, alors que ceux de 2021 sont plus concentrés avant la fin août. Ce décalage suggère une moins bonne synchronisation des apports de N en 2022 avec la phase la plus active des besoins en N de la culture contrairement aux flux observés en 2021.

Plus spécifiquement, l'Actisol et le mélange Actisol-Trident entraînent des hausses plus fortes et rapides des flux de N-NH_4 que les autres régies. Sur l'ensemble des périodes avec un effet à $P < 0{,}05$ de la fertilisation, les flux de l'Actisol et/ou de l'Actisol-Trident (75/25) sont dans les plus élevés. Cela concorde avec la nature facilement minéralisable de l'Actisol (taux de minéralisation du N_{org} de 44-55 %), à l'opposé de la luzerne qui a peu ou pas minéralisé lors de l'incubation (taux de minéralisation du N_{org} de 0-42 %). De plus, pour toutes les périodes avec un effet à $P < 0{,}05$ de la fertilisation, les flux de l'Actisol sont égaux ou supérieurs à ceux de l'Actisol-Trident (75/25) (2021 : Actisol **>** Actisol-Trident 6/7 périodes et Actisol **=** Actisol-Trident 1/7; 2022 : Actisol **>** Actisol-Trident 2/8 périodes et Actisol **=** Actisol-Trident 6/8). L'application foliaire du Trident et la part réduite de 25 % d'Actisol dans la régie Actisol-Trident expliquent ce résultat. Par ailleurs, l'ajout d'Actisol (40 %) avec la Luzerne (60 %) a permis de hausser significativement les flux de NH_4 sur plusieurs périodes, tant en 2021 (3 périodes) qu'en 2022 (4 périodes), en comparaison de la Luzerne seule. À partir du mois d'août, les flux de la régie Luzerne-Actisol (60/40) sont même égaux ou supérieurs à ceux de la régie Actisol sur toutes les périodes jusqu'en octobre. Ce résultat est intéressant considérant que l'emploi de la luzerne permet d'appliquer moins de phosphore par unité de N

apporté. Les flux Luzerne-Actisol (60/40) sont aussi moins décalés dans le temps sur la saison que ceux de la régie Luzerne seule.

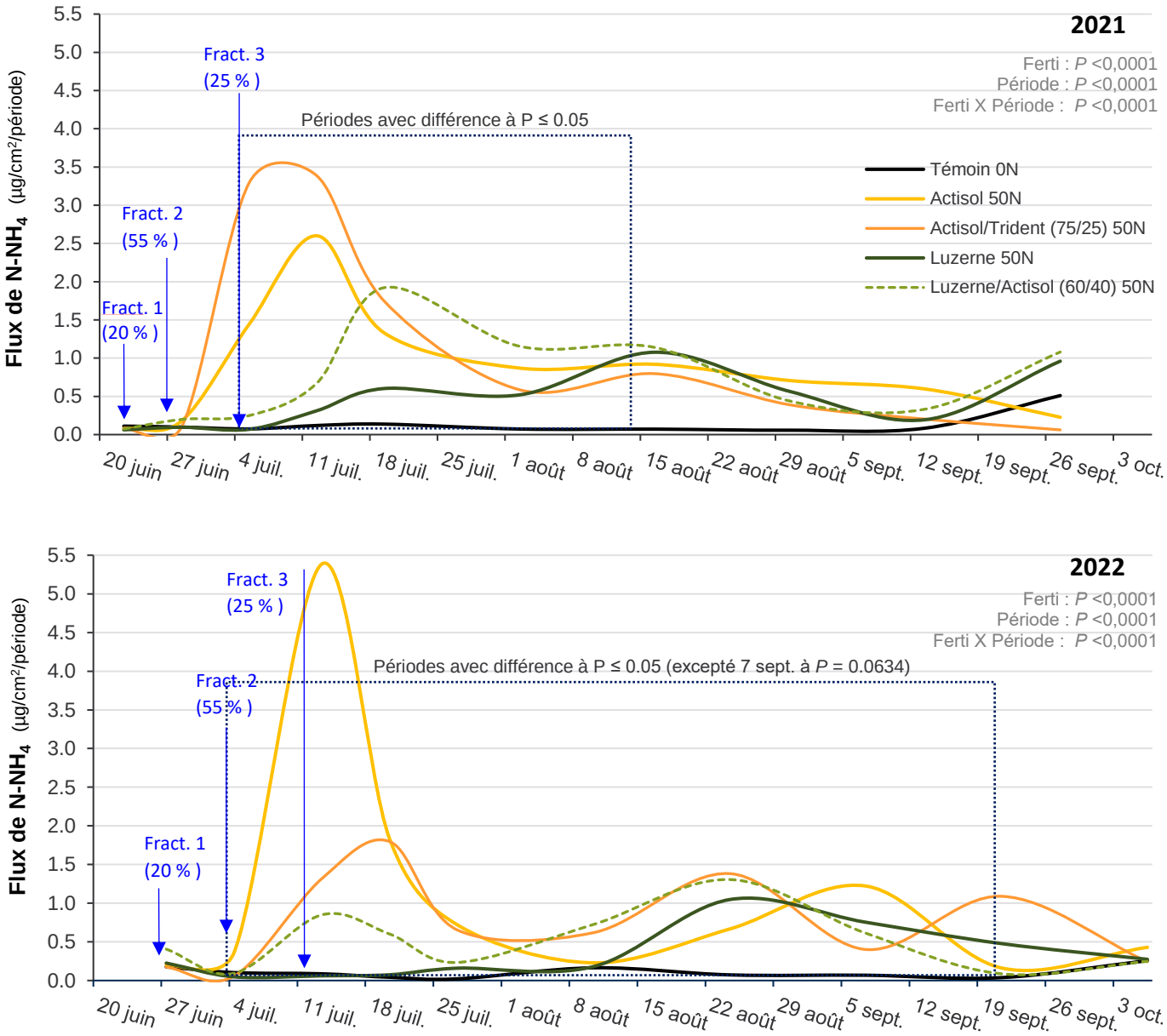


Figure 30. Flux de N-NH4 en fonction de la régie de fertilisation, pendant les saisons de croissance 2021 et 2022. Les moments des fractionnements des apports d'engrais (Fract.) sont indiqués dans les graphiques par une flèche bleue.

La somme des flux de N-NH_4 sur la saison corrobore les observations par période. Les flux totaux des régies Actisol et Actisol-Trident sont similaires et l'ajout d'Actisol dans la régie Luzerne-Actisol(60/40) permet d'augmenter les flux de 37 % en comparaison de ceux la régie Luzerne seule. La somme saisonnière permet aussi de visualiser que, malgré un taux de minéralisation inférieur du N_{org}, la Luzerne seule permet d'augmenter significativement de 2,5 × la disponibilité en N-NH_4 sur la saison, en comparaison du Témoin 0N. Dans le cas du mélange Luzerne-Actisol, la hausse est de 3,4 × de la disponibilité en N-NH_4 sur la saison, en comparaison du Témoin 0N. Dans le cas de la Luzerne seule, cette hausse ne s'est pas traduite par de meilleurs rendements en comparaison du témoin 0N (courbe de rendement vendable × dose N de Luzerne P = n.s., Figure 16). Les ROM (rendement fertilisé/rendement Témoin 0N) calculés pour chaque régie indiquent également une absence de gain (ROM entre 0,97-1,03). Par contre, pour le mélange Luzerne-Actisol, la hausse linéaire était significative (16 % de hausse à 75N vs. 0N; P = 0,0067). De même, les ROM pour les doses de 50N et 75N étaient respectivement de 1,14

et 1,23. Ces résultats positifs obtenus avec le mélange Luzerne-Actisol (60/40) suggèrent que des essais avec une part plus grande d'Actisol (60 ou 75 %) pourrait permettre le développement d'une régie intéressante pour les sols dont l'ISP_2 a atteint le seuil critique environnemental de 11 % (CRAAQ 2010), limitant les apports d'EO de faibles ratios N_{eff}/P_{tot}, ce qui est le cas d'une majorité de produits issus de déjections animales. De plus, une minéralisation annuelle plus faible peut suggérer un arrière-effet azoté qui viendrait s'additionner lors d'apports répétés. Il faudrait toutefois s'assurer que cet arrière-effet ne soit pas immobilisant. En effet, dans le cadre de la présente étude, lors de la mesure des rendements de 2022 dans le dispositif de 2021 (Figure 21), un ROM moyen de 1,58 a été mesuré dans les anciennes parcelles Luzerne-Actisol. Ce ROM est inférieur à celui des anciennes parcelles Actisol (ROM = 2), indiquant que l'arrière-effet de la Luzerne a donné de moins bons rendements que l'arrière-effet de l'Actisol. Le meilleur équilibre Actisol vs. Luzerne serait donc à trouver, ainsi que la régie permettant de mieux synchroniser la minéralisation du produit avec les besoins de la culture puisque les hausses de flux arrivent plus tardivement en présence de Luzerne. Il se pourrait aussi qu'un granule constitué de poudre de luzerne et de fientes de poules donne un meilleur résultat que l'application de granules de luzerne directement au sol (plusieurs granules sont demeurés en surface du sol en fin de saison (Figure 8)).

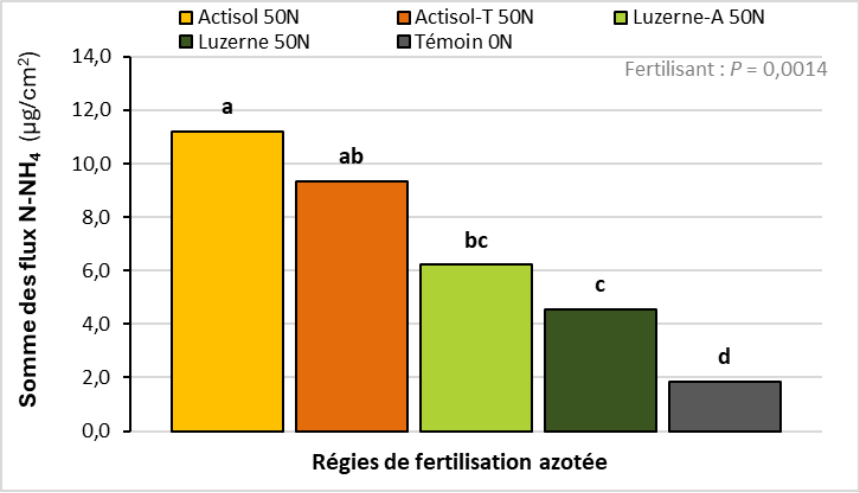


Figure 31. Somme saisonnière des flux d'ion ammonium selon les régies de fertilisation azotée, saisons 2021 et 2022 combinées.

3.2.5 Indicateurs d'activité biologique du sol

Divers indicateurs d'activités biologiques des sols ont été dosés après le 2e et/ou le 3e fractionnement afin de voir si l'apport d'engrais organiques contenant du C labile (C_{eau}) serait activateur pour les populations microbiennes du sol. Les quantités de C_{org} apportées par les régies 50N de Actisol, Actisol-T, Luzerne-A et Luzerne sont, respectivement, de 349, 262, 624 et 807 kg ha^{-1} (apport foliaire du Trident non comptabilisé). Les quantités de C_{org} apportées pour une même dose de 50 N_{tot} ha^{-1} sont donc jusqu'à 4x plus élevées selon les EO. De la même façon, les quantités de C_{eau} apportées par les régies 50N de Actisol, Actisol-T, Luzerne-A et Luzerne sont, respectivement, de 238, 179, 384 et 482 kg ha^{-1}, soit une différence maximale de 2,7 x (apport foliaire du Trident non comptabilisé). Cela dit, le mélange des produits selon les régies a fait en sorte que la proportion de C_{eau}/C_{org} est relativement stable, entre 60-68%.

Malgré ces apports de C_{org} et C_{eau}, le contenu en C labile (C_{eau}) du sol de surface (0-10 cm) n'a pas été significativement haussé en comparaison du sol Témoin 0N (sans EO). Une différence était toutefois attendue dans les sols de la régie Luzerne recevant au total la plus forte dose de C_{org} et C_{eau} (807 kg C_{org} ha^{-1}, 482 kg C_{eau} ha^{-1}). La teneur en $N\text{-}NH_4$ extrait à l'eau (pool le plus labile d'ammonium) n'a montré des différences qu'après le 3e fractionnement, avec une teneur plus grande dans les sols de la régie Actisol, alors que dans les autres sols la teneur était la même que dans le sol Témoin (sans EO). Dans le cas du contenu en C et N microbiens, seuls les contenus en N_{mic} présentent des différences. Le N_{mic} est 25-48 % plus élevé après le 3e fractionnement dans tous les sols avec EO, en comparaison du Témoin, avec une tendance à un contenu plus grand dans les sols de la régie Actisol. De plus, le taux respiratoire microbien et l'activité uréase (enzyme impliquée dans la

minéralisation du N_{org}) sont accrus dans les sols avec EO. Les différences sont similaires pour les deux variables, soit 11-28 % plus de taux respiratoire et 11-20 % plus d'activité uréase dans les sols avec EO vs. le Témoin. Ainsi, il peut être conclu que l'apport d'EO a été stimulant pour les populations microbiennes dans ces sols pauvres et acides. Les MEI ont d'ailleurs bien capté le N-NH_4 produit. Dans les deux cas, les sols des régies Actisol et Luzerne-Actisol tendaient à se démarquer à la hausse, mais globalement, la différence est surtout entre le Témoin et les régies avec EO.

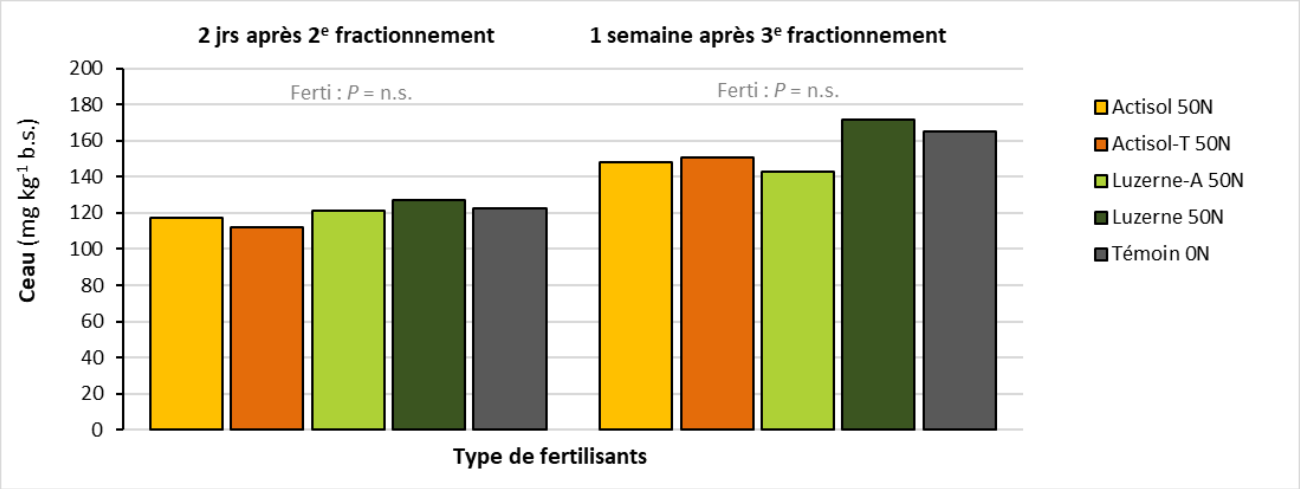


Figure 32. Contenu en C labile (C_{eau}) du sol (0-10 cm) selon l'apport ou non d'engrais organique (dose de 50 kg N ha^{-1}) suivant les 2e et le 3e fractionnement d'engrais en saison, années 2021 et 2022 combinées. La date d'échantillonnage du 2 jours après le 2e apport d'engrais a été le 30 juin en 2021 et le 6 juillet en 2022. La date d'échantillonnage du 1 semaine après le 3e apport d'engrais a été le 12 juillet en 2021 et le 20 juillet en 2022. La régie Luzerne-Trident est absente des résultats. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$.

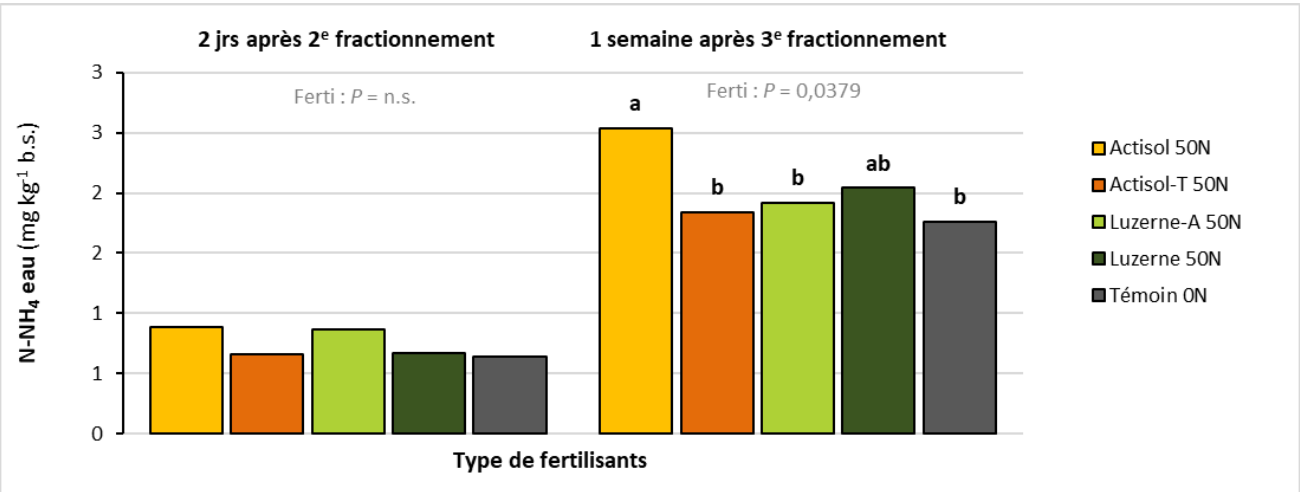


Figure 33. Contenu en ammonium (N-$NH_{4\ eau}$) du sol (0-10 cm) selon l'apport ou non d'engrais organique (dose de 50 kg N ha^{-1}) suivant les 2e et le 3e fractionnement d'engrais en saison, années 2021 et 2022 combinées. La date d'échantillonnage du 2 jours après le 2e apport d'engrais a été le 30 juin en 2021 et le 6 juillet en 2022. La date d'échantillonnage du 1 semaine après le 3e apport d'engrais a été le 12 juillet en 2021 et le 20 juillet en 2022. La régie Luzerne-Trident est absente des résultats. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$.

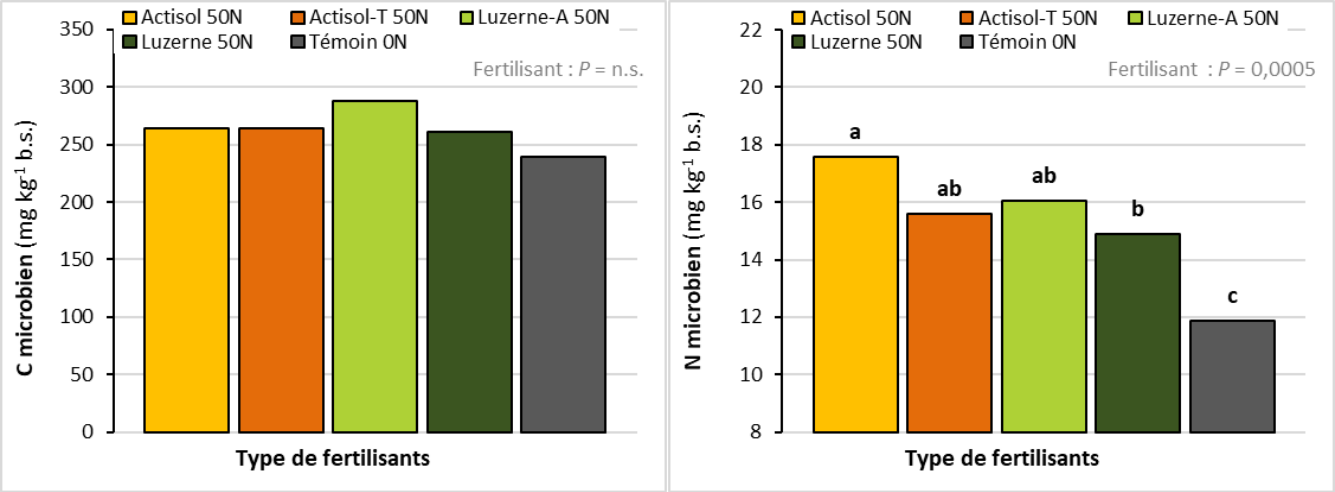


Figure 34. Contenu en C et N microbien du sol (0-10 cm) selon l'apport ou non d'engrais organique (dose de 50 kg N ha^{-1}) suivant le 3^{e} fractionnement d'engrais en saison, années 2021 et 2022 combinées. La date d'échantillonnage 1 semaine après le 3^{e} apport d'engrais a été le 12 juillet en 2021 et le 20 juillet en 2022. La régie Luzerne-Trident est absente des résultats. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$.

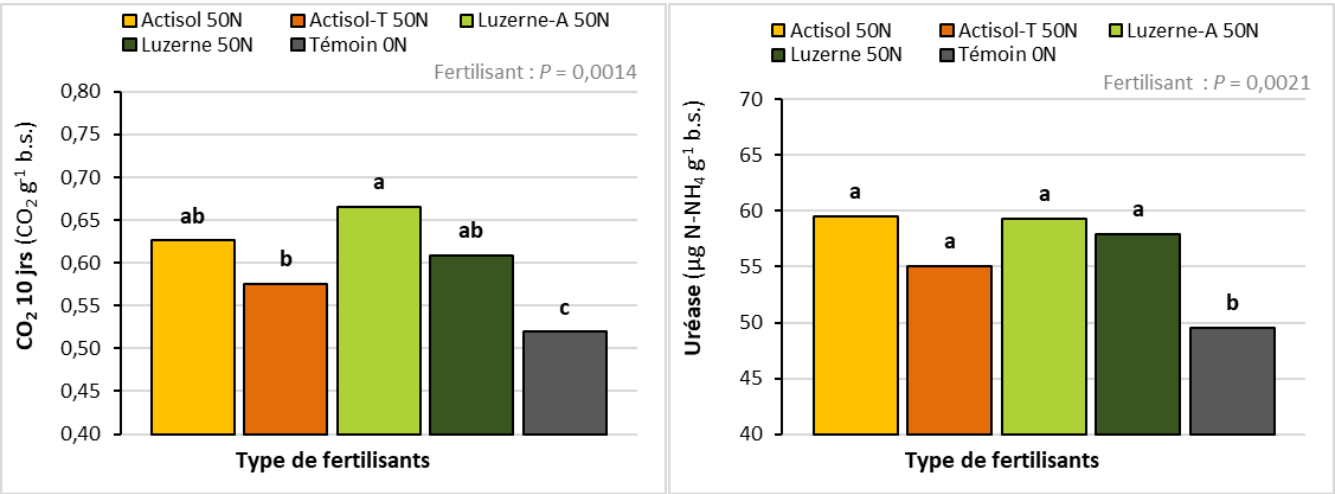


Figure 35. Taux de respiration microbienne et d'activité uréase du sol (0-10 cm) selon l'apport ou non d'engrais organique (dose de 50 kg N ha^{-1}) suivant le 3^{e} fractionnement d'engrais en saison, années 2021 et 2022 combinées. La date d'échantillonnage du 1 semaine après le 3^{e} apport d'engrais a été le 12 juillet en 2021 et le 20 juillet en 2022. La régie Luzerne-Trident est absente des résultats. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0,05$.

3.3 ANALYSE DE RENTABILITÉ DE LA FERTILISATION AZOTÉE

L'analyse de rentabilité de la fertilisation comporte trois étapes : 1) le coût de fertilisation des différentes régies, basé sur le coût des intrants (Tableau 15) et les frais encourus par leur utilisation à des doses N variables (25-50-75N) ainsi que ceux liés à l'utilisation de la machinerie nécessaire à leur application (au sol et foliaire, Tableau 16), 2) le coût de la fertilisation azotée par tonne de canneberges vendables produites (Figure 36) selon le prix de vente de la canneberges bio lors des années de l'étude (Tableau 17) et 3) la comparaison des marges sur coûts variables (MCV) des différentes régies et leur écart par rapport à la régie témoin non fertilisée en azote (0N).

Il est à noter que, tel que mentionné précédemment, les rendements produits dans les aires des dispositifs d'étude de 2021 et 2022 sont élevés au regard des rendements provinciaux du secteur biologique, mais concordent avec ceux obtenus par le producteur pour ce champ. Cependant, comme les MCV sont calculées en relation avec le traitement témoin, lui-même ayant obtenu des rendements plus élevés, celles-ci sont généralisables, toutes proportions gardées.

Le Tableau 15 présentent le prix des EO utilisés dans l'étude comme fertilisants azotés. Le Trident est le plus coûteux par unité de N, l'Actisol et la Luzerne ayant des coûts d'un même ordre de grandeur. L'emploi du Trident demande aussi un passage supplémentaire (application foliaire) à celui de l'engrais granulaire pour chaque fractionnement pour lequel il est utilisé. Il est donc un fertilisant complémentaire dans la régie saisonnière pour lequel il n'est pas recommandé de dépasser un équivalent de 5 kg N ha^{-1} par passage. Dans cette étude, au vu des doses testées, la quantité de Trident nécessaire a donc nécessité trois fractionnements. L'analyse combinée du coût du produit et des passages de machinerie (Tableau 16) permet de constater que la régie Actisol-Trident coûte environ le double (1,96 ×) de la régie Actisol seul pour une même dose de N apporté. De même, la régie Luzerne-Trident coûte entre 1,8-2 × celle de la Luzerne-Actisol, dépendamment de la dose de N apportée.

Il est toutefois important de mettre ces coûts (Tableau 16) en relation avec la productivité en fruits obtenue (Figure 17). À partir de ces données, le coût de la fertilisation azotée par tonne de canneberges vendables produites a pu être calculé, permettant de classer les régies en trois catégories de potentiel de rentabilité (1 : coût ≤ à 25 \$ t^{-1} fruits, 2 : coût entre 25-35 \$ t^{-1} fruits et 3 : coût ≥ 35 \$ t^{-1} fruits). Il s'avère que les trois traitements Actisol-seul se retrouvent dans la catégorie 1, la régie Actisol-25N ayant le plus faible ratio \$ t^{-1} fruits, autour des 10,00 \$ t^{-1}. Cette performance s'appuie sur le coût inférieur de l'intrant et sur son efficacité à soutenir une production élevée en fruits. Ainsi, bien qu'en général, ce soient les doses de 25N et 50N qui se retrouvent dans les catégories de coûts 1 et 2, la régie Actisol-75 N s'y retrouve aussi. À l'opposé, les régies combinant Luzerne et Trident sont affectées par la productivité moindre de la Luzerne et le prix plus élevé du Trident. Ainsi, la combinaison Luzerne-Trident à la plus forte dose de N (75N) génère le ratio \$ t^{-1} fruits le plus élevé, à près de 60 \$ t^{-1}, soit 6× plus élevé que le plus faible ratio (Actisol 25N).

Cette analyse doit cependant être remise dans le contexte global de coûts/revenus puisque la fertilisation représente une proportion peu élevée des dépenses au niveau des coûts variables. Pour ce faire, la marge sur coûts variables (MCV) a été calculée pour chacune des régies (Tableau 18, Figure 37). Les revenus (\$ ac^{-1}), calculés selon le prix du marché et les rendements vendables obtenus sont présentés au Tableau 18 pour l'ensemble des régies testées. Afin de faciliter la comparaison entre elles, les MCV ont toutes été confrontées à celle de la régie témoin (0N). Cette dernière ne fait donc pas partie des résultats puisqu'il s'agit de la valeur référence. Les pourcentages de gain de la MCV par rapport à celle du traitement témoin sont présentés à la Figure 37.

En considérant la MCV en comparaison du Témoin (0N), les régies offrant les plus fortes productivités ressortent au premier rang malgré des ratios coûts \$ t^{-1} les plus élevés. Ainsi, bien que la régie Actisol-75N ait un ratio coûts \$ t^{-1} deux fois plus élevé que celui de la régie la moins onéreuse (Actisol-25N), elle a dégagé une MCV 74 % plus élevée que la régie témoin (0N). En comparaison, la régie Actisol-25 (ratio coûts \$ t^{-1} le plus faible) a démontré un gain de MCV de seulement 4 %. Cela signifie un gain de MCV 18 fois plus élevé pour la régie Actisol-75N que Actisol-25N. Il est également intéressant de noter que sur les trois régies offrant des gains de MCV supérieurs, deux valorisent le Trident. Ceci démontre que le ratio coûts \$ t^{-1} fruits ne peut, à lui seul, renseigner sur le potentiel de rentabilité d'une régie de fertilisation.

En résumé, les régies apportant de 50-75 kg N_{tot} ha^{-1} sous forme de Actisol ou Actisol-Trident sont celles offrant les meilleures MCV par rapport à la régie 0N étant donné leur performance à produire en grande quantité des fruits de qualité au moment de la récolte. En effet, les deux régies présentant les meilleurs gains de MCV (Actisol-75N et Actisol-Trident-75N) sont également celles ayant présenté les meilleurs rendements (Figure 17). Les régies Luzerne-Trident 75N et Luzerne-Actisol 75N se démarquent également, avec une MCV de 23 et 24 % supérieure à celle de la régie 0N, respectivement. Cependant, plusieurs régies utilisant la Luzerne seule ou en combinaison avec Actisol ou Trident, mais à faibles doses présentent des MCV faibles et même négatives. Ces résultats pour la luzerne, utilisée en combinaison avec Actisol ou Trident, appuient la pertinence de réaliser davantage de recherche sur la luzerne comme intrant en agriculture biologique, tant sur l'année d'application que sur les arrières-effets qui pourraient compliquer sa gestion puisqu'elle se dégrade lentement. Par ailleurs, l'aspect potassium qui n'était pas suivi dans cette étude pourrait hausser l'intérêt pour cet EO.

Tableau 15. Prix des engrais organiques utilisés dans les différentes régies de fertilisation azotée.

Type d'engrais	Prix 2021-2022	Coût par kg N ($)
Actisol	505,00 $ t^{-1}	10,00
Trident[1]	3,50 $ l^{-1}	58,00
Granules de luzerne	435,00 $ t^{-1}	17,00

[1]Densité du Trident 1,19 kg L^{-1}

Tableau 16. Coûts ($ ac^{-1}) des différentes régies de fertilisation azotée basés sur les intrants et les passages de machinerie.

Régies de fertilisation[1]	Dose (kg N ha^{-1})	Applications		Intrants			Total des coûts ($ ac^{-1})
		Granulaire	Liquide	Actisol	Trident	Luzerne	
Actisol	25	22 $	- $	102 $	- $	- $	124 $
	50	22 $	- $	204 $	- $	- $	226 $
	75	22 $	- $	307 $	- $	- $	328 $
Actisol-Trident	25	22 $	20 $	77 $	124 $	- $	242 $
	50	22 $	20 $	153 $	248 $	- $	443 $
	75	22 $	20 $	230 $	372 $	- $	643 $
Luzerne	25	22 $	- $	- $	- $	176 $	198 $
	50	22 $	- $	- $	- $	352 $	374 $
	75	22 $	- $	- $	- $	528 $	550 $
Luzerne-Actisol	25	22 $	- $	41 $	- $	106 $	168 $
	50	22 $	- $	82 $	- $	211 $	315 $
	75	22 $	- $	123 $	- $	317 $	461 $
Luzerne-Trident	25	22 $	20 $	- $	124 $	132 $	297 $
	50	22 $	20 $	- $	248 $	264 $	554 $
	75	22 $	20 $	- $	372 $	396 $	810 $

Tableau 17. Prix de vente de la canneberge biologique 2021-2024

Année	Prix de vente ($ lb^{-1})
2021	0,51
2022	0,59

[1]Prix du marché obtenu auprès des entreprises, 2024.

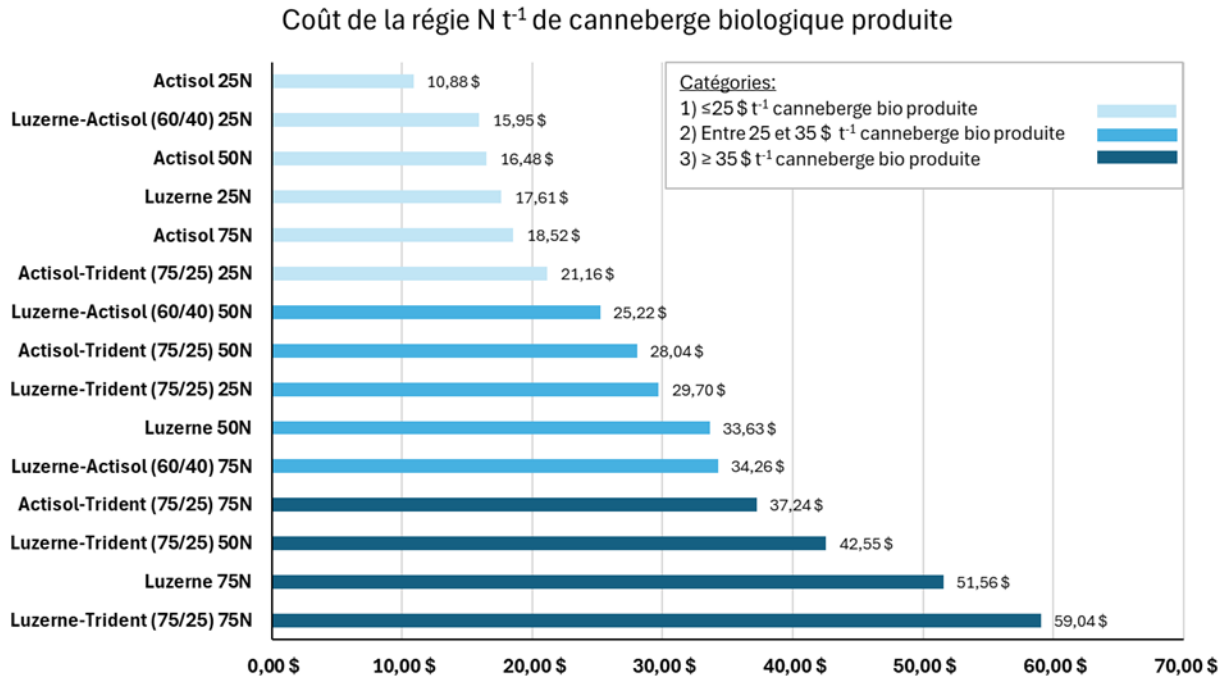


Figure 36. Coût des différentes régies de fertilisation N par tonne (t) de canneberge produite. Calculs basés sur les rendements vendables 2021-2022 du projet, le prix de vente 2021-2022 de la canneberge biologique au Québec (prix obtenus auprès des entreprises, 2024) et le coût des différentes régies de fertilisation selon le coût des intrants et des coûts additionnels de machinerie (intrants : prix des fournisseurs, machinerie : coûts obtenus auprès des entreprises).

Tableau 18. Revenus moyens (2021-2022) pour un acre de canneberges biologiques obtenues dans le cadre de l'étude.

Régies de fertilisation	Dose	Rdt vendable moyen (lb ac^{-1})	Prix de vente moyen ($ lb^{-1})	Revenus moyens ($ ac^{-1})
Témoin	0	24 148	0,55	13 281 $
Actisol	25	25 112	0,55	13 812 $
	50	30 257	0,55	16 641 $
	75	39 076	0,55	21 492 $
Actisol-Trident	25	25 218	0,55	13 870 $
	50	34 814	0,55	19 148 $
	75	38 096	0,55	20 953 $
Luzerne	25	24 759	0,55	13 617 $
	50	24 508	0,55	13 479 $
	75	23 515	0,55	12 933 $
Luzerne-Actisol	25	23 255	0,55	12 790 $
	50	27 521	0,55	15 137 $
	75	29 685	0,55	16 327 $
Luzerne-Trident	25	22 081	0,55	12 145 $
	50	28 681	0,55	15 775 $
	75	30 233	0,55	16 628 $

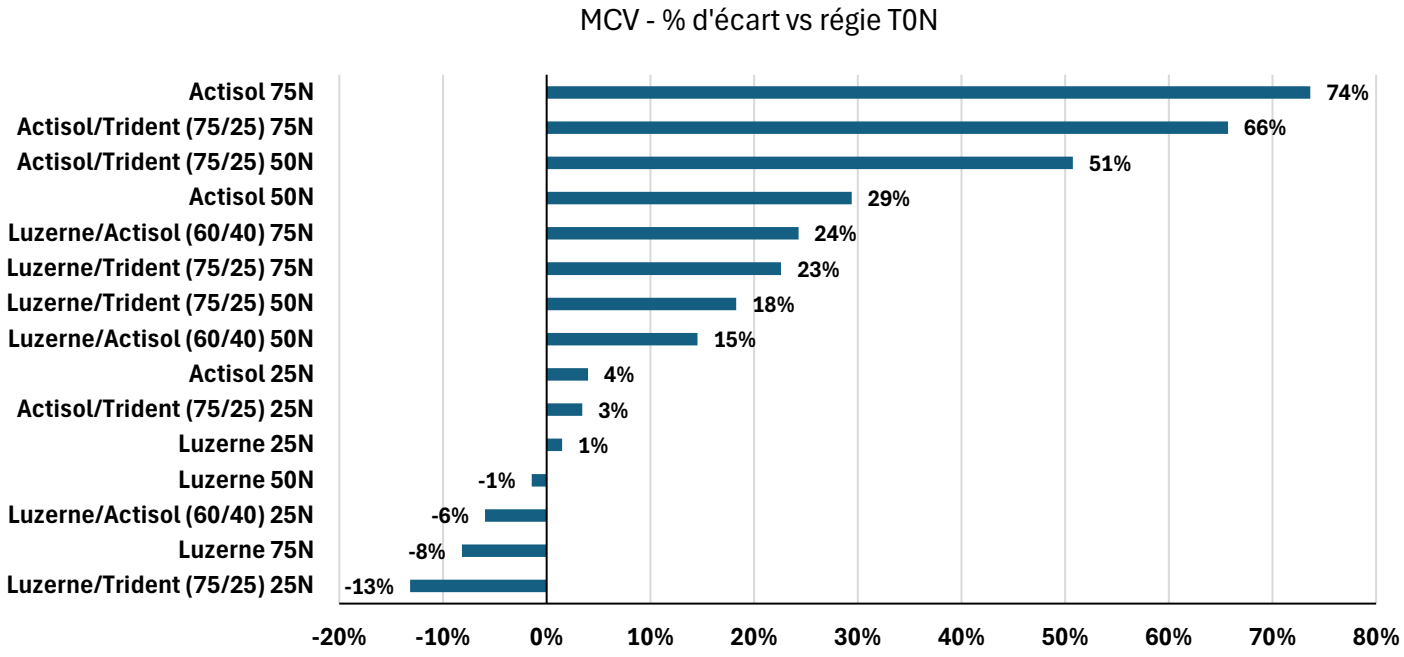


Figure 37. Écart entre la marge sur coût variables des différentes régies de fertilisation par rapport à la régie Témoin 0N.

En conclusion, l'analyse économique présentée ci-haut nous permet d'affirmer quelle régie offre le meilleur potentiel de rentabilité en regard des coûts additionnels liés à la régie (coûts des intrants et machinerie). Toutefois, l'analyse ne détaille pas si les régies sont rentables pour l'entreprise, c'est-à-dire si les rendements obtenus et par conséquent les revenus atteints permettent de soutenir économiquement l'entreprise, car cela dépend de la santé financière de l'entreprise (coûts variables et fixes, main-d'œuvre, frais financiers et administratifs, dette et intérêts), mais également du prix du marché qui peut varier d'une année à l'autre. Il demeure que, dans les stratégies proposées, certaines présentaient des MCV généreuses permettant d'orienter les choix vers un type de fertilisation au détriment d'un autre. Toutefois, les bénéfices de l'intrant ne s'arrêtent pas seulement à leur valeur fertilisante. L'activation de la vie du sol, la préservation de l'environnement par la nature de l'engrais (ex. engrais engendrant moins de lessivage), les bénéfices sur les mécanismes de défense des plantes devant les ravageurs doivent aussi être pris en considération pour la durabilité de la production. Ces bénéfices sont difficiles à chiffrer économiquement et davantage de recherche doit être conduite pour tirer des conclusions robustes.

4 CONCLUSION

Le Québec est chef de file dans la culture biologique de la canneberge. Cette production renferme cependant son lot de défis, dont la fertilisation qui est déterminante dans l'atteinte des rendements et de la qualité des fruits. Ce projet (2019-2022) visait donc à caractériser le potentiel azoté (quantité et vitesse de fourniture en N minéral (N_{min})) de divers engrais organique (EO) pour des sols jeunes (1 an d'exploitation) ou matures (13 ans d'exploitation) à différentes températures. Il visait aussi à tester les EO en champ sur deux saisons en effectuant un suivi de la quantité et de la qualité des fruits produits, des flux de N_{min} et de l'activité microbienne des sols. La cinétique de minéralisation du N organique (N_{org}) de cinq EO (fientes granulées de poules (FGP) (Acti-Sol), FGP + farine de sang (Vivaco), solution d'acides aminés d'origine marine (Trident) (Organic Ocean) et granules de luzerne (Eco-Luzerne)) a été mesurée par incubation en conditions contrôlées à 14 °C et 23 °C, pour les deux types de sols sur 112 jours. Les essais en champ se sont déroulés en dans une cannebergière mature du Centre-du-Québec. Les régies N testées étaient : Actisol, Luzerne, Actisol/Trident (75/25), Luzerne-Actisol (60/40) et Luzerne/Trident (75/25) aux doses de 0, 25, 50, 75 kg N ha^{-1}. Les principaux faits saillants sont :

- La production de N_{min} à partir des EO est abaissée dans les sols jeunes et par la température froideTableau 10. L'âge est cependant déterminant. Ainsi, les sols jeunes sont beaucoup plus affectés par les températures froides que les sols matures qui produisent toujours plus de N_{min} (1,10 – 1,63 x) que les sols jeunes pour un même EO et température.
- Le type d'EO fait la plus grande différence sur la disponibilité en N_{min} tant au moment de l'application, que sur la vitesse et la quantité finale produite. La minéralisation plafonnait entre 10 (Actisol, Trident) et 30 jours (Vivaco), sauf pour la luzerne qui n'a jamais plafonné. De 0 à 88 % du N_{org} a été minéralisé et entre 3 à 92 % de la valeur du témoin minéral (200 kg N_{tot} ha^{-1}) a été atteinte en additionnant le N_{min} présent au départ dans les EO à celui produit par minéralisation.
- Une hausse linéaire des rendements a été produite avec tous les EO, sauf la luzerne seule, sans plafonnement malgré des doses jusqu'à 75 kg N_{tot} ha^{-1} et une productivité élevée (moy. biannuelle ≤ 38 000 lb ac^{-1}). L'impact sur les critères de qualité à la récolte a été mineure. Les rendements les plus élevés ont été produits avec les régies Actisol et Actisol-Trident par la production de plus de fruits et non par la production de fruits plus gros. Ainsi, les apports d'Actisol ont pu être abaissés de 25 % en le combinant au Trident, sans perte de rendement. La régie Actisol (de faible ratio N/P) jumelé au Trident foliaire constitue une avenue pour aider à réduire l'enrichissement en P du sol.
- Un fort arrière-effet des régies a été mesuré sur le rendement vendable de la saison suivante malgré une fertilisation uniforme au printemps 2022 de 63 kg N_{tot} ha^{-1}, même pour les régies avec luzerne.
- En présence de hauts rendements, les exportations d'N par la récolte des fruits à atteint entre 10,4 et 18,4 kg N_{tot} ha^{-1}.
- La nature des EO influence les flux de N_{min} tout au long de la saison et non pas seulement pendant la période des apports ou les jours suivants. Ainsi, les régies avec luzerne présentent un flux retardé. Les régies ayant produit les plus hauts rendements correspondent à celles ayant des flux les plus élevés avant le moins d'août.
- Les indicateurs de santé des sols ont été moins impactés que ce qui était attendu au vu des quantités apportées de C total et labile. Cependant, le N microbien et les taux respiratoire et d'activité uréase ont été haussés dans tous les sols avec EO, en comparaison du témoin sans EO.
- Les doses apportant de 50-75 kg N_{tot} ha^{-1} sous forme de Actisol ou Actisol-Trident sont celles offrant les meilleures MCV par rapport à la régie 0N. Les régies Luzerne-Trident 75N et Luzerne-Actisol 75N se démarquent également, avec une MCV 23 et 24 % supérieure à celle de la régie 0N, respectivement. Cependant, plusieurs régies utilisant la luzerne seule ou en combinaison avec Actisol ou Trident mais à faibles doses présentent des MCV faibles et même négatives.

En conclusion, le choix de l'EO est important selon qu'une fertilisation de fond ou d'appoint est visée, ou pour obtenir une disponibilité court terme ou décalée dans le temps. Les EO avec FGP se sont démarqués, avec ou sans apport foliaire de Trident. Des résultats intéressants ont aussi été obtenus avec la luzerne lorsque celle-ci était mélangée à l'Actisol. Des recherches supplémentaires sont cependant requises pour développer une régie adéquate ou des produits plus performants. L'accroissement linéaire des rendements aux doses de N testées, ainsi que le fort arrière-effet sur les rendements l'année suivante, appuient la pertinence de conduire davantage d'essais sur la fertilisation en contexte bio, incluant la qualité en entreposage, d'autant plus que, malgré une régie bio sur plusieurs années, les sols étudiés présentaient un potentiel de fourniture en N pratiquement inexistant, ce qui rend cette culture très sensible aux pertes de rendement par manque d'azote.

5 RÉFÉRENCES

AFNOR. 2005. Fractionnement biochimique et estimation de la stabilité biologique : Méthode de caractérisation de la matière organique par solubilisations successives. Association française de normalisation. Norme XP U p.44-162.

Association des producteurs de canneberges du Québec (APCQ). 2024. Culture de la canneberge biologique au Québec 2005-2024. http://www.notrecanneberge.com/Contenu/Page/Statistiques

Bonin, S. 2009. Régie agroenvironnementale de l'irrigation dans la production de canneberges (Vaccinium macrocarpon Ait). Mémoire de maîtrise. Université Laval. 102 pages.

Boucher, V. 1999. Effet des doses de fertilisant azoté sur le rendement et la qualité des fruits de canneberge produits au Québec. Mémoire de maîtrise. Université Laval. 74 pages.

Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1993. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). Québec. AGDEX 533, méthode SS-1.

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

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2013. Chapitre 10 : Les engrais de ferme et les matières résiduelles fertilisantes organiques – Guide de référence en fertilisation du Québec, 2e édition. Pages 289-340.

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2017. Références économiques-AGDEX 233.19/821 – Canneberges biologiques – Budget.

Davenport, J. et coll. 1995. Cranberry Tissue Testing for producing beds in North America. University of Massachusetts Extension. 4 pages.

Davenport, J. et coll. 2000. Nitrogen for bearing cranberries in North America. Juin 2000. EM 8741. 21 pages.

Deland, J-P. et coll. 2017. Effect of Nitrogen Fertilization on Fresh Fruit Keeping Quality. Conférence présentée dans le cadre du North American Cranberry Research and Extension Workers Conference. https://hdl.handle.net/20.500.14394/36194

Davenport, J. R. 2004. Temperature Influences Nitrogen Release Rates in Cranberry Soils. HortScience. 39 (1) : 80-83.

Fruit d'Or. 2024a. Aperçu de la situation des récoltes et du marché de la canneberge pour la saison 2021. https://fruitdor.ca/fr/blogue/prerecolte2021-2/

Fruit d'Or. 2024b. https://fruitdor.ca/fr/blogue/recoltecanneberges_nov2022/

Gagnon, B. et coll. 2012. Forms of phosphorus in composts and in compost amended soils following incubation. Can. J. Soil Sci. 92: 711-721.

Garcia, C., Hernandez, T. et Costa, F. 1990. Study on water extract of sewage sludge compost. Soil Sci. Plant Nutr. 37 (3) :399-408.

Gavlak R. G. et coll. 2005. Plant, Soil, and Water Reference Methods for the Western Region. 3ème édition. 206 pages.

Gee, G.W. et Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed) Methods of soil analysis. Part 1. ASA. Monograph No 9. 2nd edition. Madison, WI.

Giroux, M. et Audesse, P. 2004. Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. Agrosol. 15 (2) :107-110.

Hart, J. M. et coll. 2015. Nutrient Management guide – Cranberries – A nutrient management guide for south coastal Oregon. Oregon State University. 52 pages.

Isaac, R.A. et Johnson, W.C. 1976. Determination of total nitrogen in plant tissues using a block digester. J. Ass. Off. Anal. Chem. 69 (1): 98-101.

Jamaly, S. 2017. Effet de la fertilisation N, P, K, Mg, Cu et B sur le rendement de la canneberge commerciale. Mémoire de maîtrise. Université Laval. 36 pages.

Labarre, D., Gervais, F., Careau, S., Ayotte-Breton, G., Lachance, A., Bonin, S., & Thibeault-Bédard, P. 2022. Guide des bonnes pratiques en production de canneberges. Association des producteurs de canneberges du Québec.

Landry, C., Dubé, P., Mainguy, J., Pagé, D. et Martin D.Y. 2011. Évaluation de l'efficacité fertilisante en N et P, et de l'ISB de la fraction solide de lisier de porcs conditionnée obtenue du séparateur décanteur centrifuge afin d'en déterminer la valeur économique. Rapport final CDAQ #6186. 96 pages.

Landry, C., Marchand-Roy, M., Mainguy, J., Côté, C., Généreux, M., Belzile, L. et Godonou, D. 2018. Développement d'une régie de fertilisation combinant des engrais verts et des engrais de ferme pour combler les besoins en azote d'une rotation blé/maïs-grain/soya tout en limitant les apports de phosphore en production biologique. Rapport final IA 115487. IRDA. 46 pages.

Landry, C., Marchand-Roy, M., Mainguy, J. et Paradis, M. 2019. Détermination terrain du coefficient d'efficacité azoté et du délai de libération du N des fientes granulées de poules pondeuses dans les cultures de maïs-grain et avoine. Rapport final IA 216694. IRDA. 50 pages.

Landry, C., Joseph, C.-A., Houde, S., Forest-D., J., et Grenier, M. 2021. Fertilisation du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 04. Présenté au ministère de l'agriculture et des pêcheries. 122 pages.

Landry, C., Joseph, C.-A., Houde, S., Forest-D., J., et Grenier, M. 2022a. Fertilisation de l'oignon espagnol en sol minéral. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 06. Présenté au ministère de l'agriculture et des pêcheries. 75 pages.

Landry, C., Joseph, C.-A., Houde, S., Forest-D., J., et Grenier, M. 2022b. Fertilisation de la betterave potagère. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 05. Présenté au ministère de l'agriculture et des pêcheries. 80 pages.

Landry, C., Mainguy, J., Marchand-Roy, M. et Langelier, M. 2023. Étude comparative d'engrais organiques à haut ratio N_{eff}/P_{total} pour le développement de stratégies de fertilisation productives et durables en maraîchage biologique. Rapport final 19-001-3.1-F-IRDA. IRDA et partenaires. 49 pages.

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, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2025. Culture de la canneberge. https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec/productions-agricoles/culture-canneberge

Morneau, C. 2021. La récolte de canneberges moins prometteuse que prévu. La Terre de chez nous. https://www.laterre.ca/actualites/la-recolte-de-canneberges-moins-prometteuse-que-prevu/

Morneau, C. 2024. Grosse récolte de canneberges, mais de moins en moins bio. La Terre de chez nous. https://www.laterre.ca/productions/petits-fruits/grosse-recolte-de-canneberges-mais-de-moins-en-moins-bio/

Painchaud, J. 2017. L'adaptation de l'industrie québécoise de la canneberge aux conditions du marché : la grosse part va à la R & D. Conférence présentée dans le cadre de la Journée d'information sur le bleuet sauvage – Dolbeau-Mistassini – 15 mars 2017.

Parent, L.-É. et Marchand, S. 2006. Response to phosphorus of cranberry on high phosphorus testing acid sandy soils. Soil Science of America Journal. 70 :1914-1921.

Radio-Canada. 2023. Ici Mauricie-Centre-du-Québec. « Saison parfaite » pour les producteurs de canneberges. https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1946700/canneberges-recoltes-record-2022-centre-du-quebec#:~:text=Les%20producteurs%20qu%C3%A9b%C3%A9cois%20de%20canneberges,Association%20des%20producteurs%20de%20canneberges

Rioux et coll. 2018. Portrait diagnostic sectoriel de la canneberge au Québec – MAPAQ. 16 pages.

Roper, T. R. et Krueger, A. R. 2004. Rate of Ammonium Uptake by Cranberry (Vaccinium macrocarpon Ait.) Vines in the Fields is Affected by Temperature. HortScience. 39 (3) :588-590.

Serres, R. 2017. Fruit Quality and Trends in the Cranberry Industry. Conférence présentée dans le cadre du BC Cranberry Congress. 7 février 2017.

Samson, L-P. 2023. Deux saisons en une pour les producteurs de canneberges. https://www.journalexpress.ca/2023/01/10/deux-saisons-en-une-pour-les-producteurs-de-canneberges/

SAS 9.4, SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA

Salomons, W. et Gerritse, R.G. 1981. Some observations on the occurrence of phosphorus in recent sediments from western Europe. The Science of the Total Environment. 17 (1) :37-49.

Sapers, G.M., Phillips, J.G., Rudolf, H.M. et Divito, A.M. 1983. Cranberry quality selection procedures for breeding programs. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 108: 241–246.

Singh, R. et Nye, P.H. 1984. The effect of soil pH and high urea concentration on urease activity in soil. Journal of Soil Science. 35: 519-527.

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

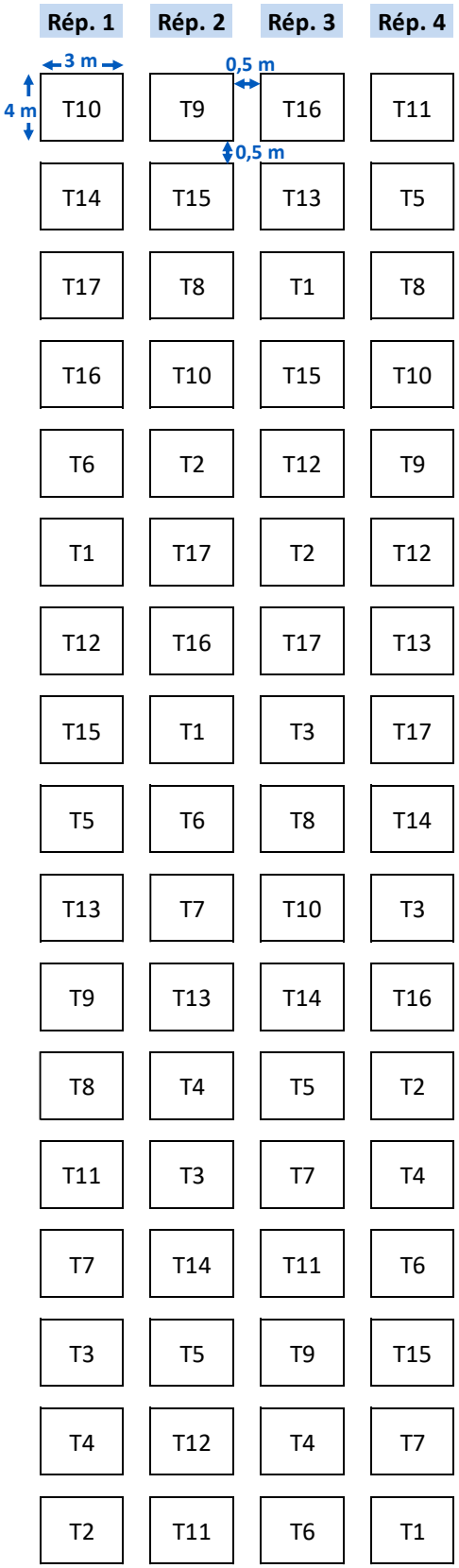
Tran, T.S. et Simard, R.R. 1993. Mehlich III-extractable elements. p. 43-49. In M.R. Carter (ed.) Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publ., CRC Press, Boca Ration, FL.

Voroney R.P. et coll. 2008. Chapter 49- Soil Microbial Biomass C, N, P and S. DOI:10.1201/9781420005271.ch49

Vorsa, N. et Welker, W.V. 1985. Relationship between fruit size and extractable anthocyanin content in cranberry. HortScience. 20: 402–403.

Zaouchi. Y. 2015. Dynamique de la minéralisation du carbone et de l'azote organiques dans des sols d'origines pédoclimatiques différentes: une expérience d'incubation. Journal of new sciences, Agriculture and Biotechnology. 19 (7) : 748-758.

Annexe 1



TRAIT.	RÉGIES	Doses N_{tot} (kg ha^{-1})
T1	Témoin	0
T2	Actisol	25
T3		50
T4		75
T5	Luzerne	25
T6		50
T7		75
T8	Luzerne/Actisol (60/40)	25
T9		50
T10		75
T11		100
T12	Luzerne/Trident (75/25)	25
T13		50
T14		75
T15	Actisol/Trident (75/25)	25
T16		50
T17		75

Figure 38. Plan du dispositif expérimental en 2021 et 2022. Le T11 n'a pas été utilisé dans l'étude afin d'avoir une structure factorielle complète des traitements.