

RAPPORT FINAL 19-001-3.1-F-IRDA

ÉTUDE COMPARATIVE D'ENGRAIS ORGANIQUES POUR LE DÉVELOPPEMENT DE STRATÉGIES DE FERTILISATION À HAUT RATIO $N_{\text{EFFICACE}}/P_{\text{TOTAL}}$ PRODUCTIVES ET DURABLES EN MARÂCHAGE BIOLOGIQUE.

DURÉE DU PROJET : 04-2019 / 02-2022



Auteure ou responsable scientifique : Christine Landry, agr., biologiste PhD - IRDA

Co-auteurs : Julie Mainguy, Mylène Marchand-Roy, Maude Langelier - IRDA

Collaborateurs : Karine Bertrand, Yveline Martin – Club Bio-Action

Mylène Généreux, Paul Deschênes – IRDA

Rapport présenté au : Programme Prime-Vert, sous-volet 3.1, MAPAQ

Date : 25 février 2023

Projet IRDA # : 400131

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

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

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

Notre mission

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

Notre vision

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

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

PARTENAIRES



Étude comparative d'engrais organiques à haut ratio $N_{\text{efficace}}/P_{\text{total}}$ pour le développement de stratégies de fertilisation productives et durables en maraîchage biologique.

Rapport final 19-001-3.1-F-IRDA

Présenté à : **Programme Prime-Vert, sous-volet 3.1, MAPAQ**

Préparé par :

Christine Landry, agr., biol., Ph.D.
Chercheure IRDA

Mylène Marchand-Roy, agr., M.Sc.
Professionnelle de recherche, IRDA

Julie Mainguy, agr.
Professionnelle de recherche, IRDA

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., J. Mainguy, M. Marchand-Roy et M. Langelier. 2023. Étude comparative d'engrais organiques à haut ratio $N_{\text{efficace}}/P_{\text{total}}$ 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.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Christine Landry, Ph. D., IRDA
- Julie Mainguy, B. Sc., IRDA
- Mylène Marchand-Roy, M. Sc., IRDA
- Maude Langelier, M. Sc., IRDA
- Mylène Généreux, M. Sc., IRDA
- Paul Deschênes, M. Sc., IRDA
- Caroline Côté, Ph. D., IRDA
- Carl Boivin, M. Sc., IRDA

ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

- Chercheure principale, Christine Landry, Ph. D., IRDA
- Julie Mainguy, B. Sc., IRDA
- Mylène Marchand-Roy, M. Sc., IRDA
- Stéphanie Houde, M. Sc., IRDA

COLLABORATEURS

- Karine Bertrand, agr., Club Bio-Action
- Yveline Martin, agr., Club Bio-Action

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Christine Landry

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 640

Courriel : christine.landry@irda.gc.ca

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé dans le cadre du sous-volet 3.1 du programme Prime-Vert – Appui au développement expérimental, à l'adaptation technologique et au transfert technologique des connaissances en agroenvironnement avec une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Les auteurs désirent remercier les membres de la Coopérative pour l'Agriculture de Proximité Écologique (CAPÉ), qui ont appuyé les démarches de ce projet et ont contribué à son essor grâce à leur curiosité et à leur engouement pour la recherche de solutions durables en agriculture. Les auteurs remercient également les nombreuses personnes qui ont contribué au succès du projet; technicien agricole, ouvriers de la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville, personnel technique des différents laboratoires d'analyse de l'IRDA, les étudiants d'été ainsi que les agronomes du Club Bio-Action, de même que les entreprises Eco-Luzerne et Actisol pour leur contribution au niveau des intrants.

TABLE DES MATIÈRES

1	Description du projet.....	4
1.1	Mise en contexte	4
1.2	Objectifs.....	5
2	Matériel et méthodes.....	6
2.1	Mise en place de l'expérience	6
2.2	Traitements	9
2.3	Dispositif expérimental et analyses statistiques	10
2.4	Suivi hydrique du sol.....	11
2.5	Suivi <i>in situ</i> des MEI	13
2.6	Collecte des données.....	14
2.6.1	Méthodes d'analyses.....	16
2.6.2	Calcul du taux d'utilisation apparent (TUA) du N.....	17
2.7	Analyse coûts-bénéfices	18
3	Résultats et discussion	19
3.1	Disponibilité en eau, humidité du sol et T° Sol et Air.....	19
3.2	Caractérisation physico-chimique des engrais organiques en termes d'éléments fertilisants et de contenu carboné	22
3.3	Délai et intensité de fourniture en nitrate sur la saison	25
3.4	Activité biologique du sol	28
3.5	Contenus en phosphore et potassium disponibles du sol.....	29
3.6	Développement et nutrition de la culture.....	31
3.7	Productivité de la culture	34
3.8	Bilan d'utilisation de l'azote	37
3.9	Analyse coûts-bénéfices	39
3.10	Nitrate résiduel et bilan phosphore	40
4	Conclusion	42
	Références.....	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Caractéristiques physico-chimiques du sol avant l'implantation du dispositif au printemps.	6
Tableau 2.	Dates des principales opérations culturales lors des deux années de l'essai.....	9
Tableau 3.	Dates et stades de développement de la culture lors des divers échantillonnages en saison.....	15
Tableau 4.	Apports réels en N, P ₂ O ₅ et K ₂ O à l'hectare provenant des engrais organiques appliqués.....	22
Tableau 5.	Caractéristiques physico-chimiques des engrais organiques.	24
Tableau 6.	Teneurs en nitrate du sol en fonction des traitements de fertilisation le 19 juin (23 JAP) et le 3 juillet (37 JAP), saison 2019.	28
Tableau 7.	Valeurs de différents indicateurs d'activité microbologique du sol en fonction des traitements de fertilisation le 19 juin (23 JAP) et le 3 juillet (37 JAP), saison 2019.	29
Tableau 8.	Valeurs de différents indicateurs d'activité microbologique du sol en fonction des traitements de fertilisation le 9 juin (23 JAP) et le 23 juin (37 JAP), saison 2021.	29
Tableau 9.	Prélèvements totaux en N-P ₂ O ₅ -K ₂ O en saison (10 juillet - 44 JAP) et à la récolte (18 juillet - 52 JAP-récolte) et exportations en N par la culture en fonction des traitements de fertilisation, saison 2019.	33
Tableau 10.	Prélèvements totaux en N-P ₂ O ₅ -K ₂ O en saison (23 juin - 37 JAP; 30 juin - 44 JAP) et à la récolte (7 juillet - 52 JAP) et exportations en N par la culture en fonction des traitements de fertilisation, saison 2021.	34
Tableau 11.	Statut nutritionnel du brocoli au stade 8-10 feuilles en fonction des traitements de fertilisation, 2019 et 2021.	34
Tableau 12.	Classement des brocolis selon le diamètre de la tête, le pourcentage de pertes et le calibre moyen en fonction des traitements de fertilisation, 2019 et 2021.....	36
Tableau 13.	Bilan azoté et taux d'utilisation apparent (TUA) du N des engrais organiques (EO), 2019 et 2021... ..	38
Tableau 14.	Potentiel de production de nitrate post récolte (52 JAP) en fonction de la fertilisation, 2019 et 2021.	39
Tableau 15.	Coûts variables de production de brocolis biologiques en fonction des types d'EO utilisés pour des apports équivalents de 170 kg Ntotal ha ⁻¹ et pour une superficie de production de 1000 m ²	40
Tableau 16.	Marge sur coûts variables de production de brocolis biologiques en marché de proximité (kiosque directement à la ferme) en fonction des types d'EO utilisés et des calibres produits pour une superficie de 1000 m ² (moyenne des deux années d'essai).....	40
Tableau 17.	N résiduel et teneur en P soluble du sol à la récolte (52 JAP) en fonction des traitements de fertilisation, 2019 et 2021.....	41
Tableau 18.	Bilan P (P ₂ O ₅) à la récolte (52 JAP) en fonction des traitements de fertilisation, 2019 et 2021.....	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Applications des différents engrais organiques, 17 mai 2021.	7
Figure 2.	Formation des buttes et pose du paillis et des tuyaux d'irrigation, 27 mai 2019.	8
Figure 3.	Transplantation des brocolis, 17 mai 2021.	8
Figure 4.	Dispositif expérimental au site d'essai.	11
Figure 5.	Représentation de l'emplacement des sondes TDR dans la butte (image de gauche) et sondes installées (image de droite), saison 2019.	12
Figure 6.	Module TX3 de Hortau et sondes de température, saison 2019.	12
Figure 7.	Changement des membranes d'échange ioniques au champ, saison 2019.	13
Figure 8.	Courbe de prélèvement en N du brocoli d'été, adapté de Smith et coll. (2015).	15
Figure 9.	Données climatiques au site d'essai pour la saison de croissance 2019.	20
Figure 10.	Données climatiques au site d'essai pour la saison de croissance 2021.	20
Figure 11.	Suivi de la température (°C) du sol (moyenne des huit sondes), saisons 2019 et 2021.	21
Figure 12.	Suivi de tension en eau (kPa) du sol (moyenne des quatre tensiomètres), saisons en 2019 et 2021. .	21
Figure 13.	Suivi de la teneur en eau volumique (cm ³ /cm ³) du sol, mesurée par les TDR, saison 2019 et 2021.	22
Figure 14.	Dynamique des flux de nitrate dans le sol de la butte (strate 0-20 cm) au cours des cinq périodes de suivi selon les traitements de fertilisation, en 2019 et 2021.	27
Figure 15.	Contenu en P _{eau} du sol au stade 37 jours après plantation (2019 : 3 juillet et 2021 : 23 juin).	30
Figure 16.	Contenu en K _{soluble} du sol au stade 37 jours après plantation (2019 : 3 juillet et 2021 : 23 juin).	30
Figure 17.	Évolution de la biomasse aérienne des plants en cours des saisons 2019 et 2021, en fonction des traitements de fertilisation.	32
Figure 18.	Vu d'ensemble du développement des plants de brocolis 37 jours après plantation (haut : 3 juillet 2019; bas 23 juin 2021).	32
Figure 19.	Développement des plants de brocolis 37 jours après plantation, saison 2019.	32
Figure 20.	Rendement vendable en brocoli à la récolte en fonction des traitements de fertilisation, 2019 et 2021.	35
Figure 21.	Têtes de brocolis récoltées selon les différents traitements de fertilisation pour une zone de rendement (3,44 m; 16 plants), saison 2021.	35
Figure 22.	Brocolis à maturité – exemple de calibres obtenus lors de la saison 2021 selon les différents traitements de fertilisation.	36

1 DESCRIPTION DU PROJET

1.1 MISE EN CONTEXTE

L'agriculture biologique, en pleine expansion au Québec, a été désignée comme l'un des huit vecteurs de croissance dans la nouvelle Politique bioalimentaire 2018-2025. Une cible de doublement des superficies d'ici 2025 a ainsi été adoptée au Sommet sur l'alimentation. Les productions maraîchères s'inscrivent dans ce mouvement. Celles-ci sont toutefois particulièrement touchées par un des principaux freins à l'expansion des productions biologiques, soit l'accès à une régie de fertilisation azotée (N) performante et durable, c'est-à-dire à ratio N efficace sur phosphore (P) total ($N_{\text{eff}}/P_{\text{total}}$) élevé. Les engrais organiques (EO) utilisés sont en effet le plus fréquemment des engrais de ferme, peu coûteux, mais de faible efficacité N et riches en P (composts et fumiers). Ceci engendre des apports de P plus grands que nécessaires pour répondre aux besoins azotés de la culture. Les cultures maraîchères, exigeantes en N, sont donc fortement pénalisées. De plus, leur pic de prélèvements en N arrive tôt et celui-ci doit être fourni avec intensité et rapidité. En parallèle, la régie de production sur buttes plastifiées, très répandue en production maraîchère, oblige à l'apport de tout l'engrais au buttage, empêchant ainsi son fractionnement, tel que recommandé lorsque les engrais sont efficaces et les quantités totales à apporter élevées. Puisque les cultures maraîchères ont une forte valeur économique, des produits commerciaux, tels le compost marin (ex. Biosol) (compost) et les fientes granulées de poules (ex. Actisol) (FGP) gagnent en popularité. Ces produits apportent toutefois encore des quantités notables de P, en plus d'être plus coûteux que les engrais de ferme usuels. Certains, telles les FGP sont également parfois en rupture de stock, dû à leur popularité croissante. Des producteurs se sont donc tournés vers l'achat groupé de granules de farine de luzerne (GFL) dont le ratio $N_{\text{eff}}/P_{\text{total}}$ pourrait être intéressant et dont les coûts sont similaires à ceux des FGP. De plus, leur ratio azote/potassium (N/K) est plus près de celui des besoins des cultures. Les GFL pourraient donc s'avérer être un engrais potassique intéressant, en plus de leur potentiel azoté.

Outre l'Actisol, pour lequel le coefficient d'efficacité de l'N (CEN) a déjà été déterminé (Landry et coll. 2017), le délai et l'intensité de libération du N de ces produits n'est toutefois pas connu, ce qui est un inconvénient majeur au moment de décider des modes et quantités d'apport. Cela entraîne des risques financiers importants pour les agriculteurs, doublés dans le cas des produits riches en P_{total} , d'un risque environnemental en cas de sur fertilisation. Une meilleure connaissance du comportement et de la valeur comme engrais des GFL, des FGP et du compost Biosol s'avère ainsi essentielle pour soutenir un rendement élevé et stable, tout en protégeant les sols et l'environnement.

1.2 OBJECTIFS

Globalement, ce projet vise à fournir les informations nécessaires à l'établissement, à court terme, d'une régie de fertilisation permettant une forte productivité des cultures maraîchères par l'apport du N disponible nécessaire et la protection de la santé des sols et de l'environnement en maximisant les apports de carbone (C) labile et en minimisant les apports de P excédentaires et le nitrate résiduel.

De façon plus détaillée, ce projet a été conçu afin de :

- Caractériser, pour deux engrais organiques (EO) couramment utilisés (FGP et compost) et un produit émergent (GFL), les contenus en éléments fertilisants (NPK), en carbone labile et leur résistance à la minéralisation.
- Déterminer, suivant l'apport au sol des EO :
 - leur délai et intensité de fourniture en nitrate,
 - leur impact sur les contenus labiles de NPK,
 - leur impact sur la teneur en C labile et l'activité microbienne de minéralisation du N reconnus comme indicateurs de santé des sols.
- Mesurer l'effet des EO sur le développement, la nutrition NPK et le rendement vendable du brocoli.
- Comparer les coûts des EO pour fournir les quantités nécessaires selon leur efficacité azotée.
- Établir le bilan phosphore de chacune des régies et le nitrate résiduel en fin de production.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 MISE EN PLACE DE L'EXPÉRIENCE

Le projet s'est déroulé à la Plateforme d'innovation en agriculture biologique (PIAB) de l'IRDA, située à St-Bruno-de-Montarville, en collaboration avec des agronomes du Club Bio-Action de la Montérégie. L'essai a été répété pendant deux saisons de croissances (2019 et 2021) dans un même champ, mais à un emplacement différent à chaque année pour éviter l'effet résiduel des engrais organiques. Le champ de l'essai était propice à la production maraîchère et avait un faible taux de matière organique, répondant ainsi aux critères recherchés pour l'étude. Les deux sites d'essai ont été tenus sur des sols de type sableux avec un gradient au niveau des blocs variant de sable à loam sablo-argileux. Les propriétés physico-chimiques de la couche de surface du sol (0-20 cm) sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol avant l'implantation du dispositif au printemps.

Paramètres	2019	2021
pH _{eau}	6,6	6,5
Matière organique (%)	1,45	1,67
N-NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹ b.s.) ¹	13	12
N _{min total} (kg ha ⁻¹ b.s.)	17	15
Texture	Loam sablo-argileux à sable	Loam sableux à sable loameux
Densité apparente (0-20 cm) (g cm ⁻³)	1,8	1,5
Éléments majeurs Mehlich-3 (kg ha⁻¹ b.s.)		
P	309	283
K	322	234
Ca	2055	1898
Mg	291	235
Al (mg kg ⁻¹)	908	987
P _{M3} /Al _{M3} (%)	15,8	13,2
Éléments mineurs Mehlich-3 (mg kg⁻¹ b.s.)		
B	0,181	0,137
Cu	2,33	1,99
Fe	301	274
Mn	44	43
Zn	2,21	1,99
Na	7,69	5,39

¹ Selon la MVA prélevée au champ sur la strate 0-20 cm

Le brocoli a été cultivé sur butte plastifiée et irriguée avec deux lignes de goutte à goutte et deux rangées de plants, soit une régie adoptée par plusieurs producteurs maraîchers biologiques pour ses divers avantages (contrôle des mauvaises herbes, efficacité irrigation). Les besoins en N pour la culture ont été établis à 170 kg N ha⁻¹ (CRAAQ, 2010). Les besoins en P et K ont été fixés en fonction de l'analyse de sol (Mehlich-3), à chacune des années, selon les recommandations du *Guide de référence en fertilisation* (CRAAQ, 2010). Pour les deux années à l'étude, dans les traitements fertilisés au moyen des différents EO, aucun apport complémentaire en P et K n'a été requis puisque les EO utilisés couvraient les besoins de la culture. Dans le traitement témoin ON, les besoins

phosphatés et potassiques ont été comblés par de la poudre d'os et du sulfate de potasse, respectivement. Préalablement à la transplantation, les quantités requises d'EO ont été calculées. En attente des résultats de caractérisation des engrais organiques, les doses à appliquer au champ pour combler les besoins visés de 170 kg N ha⁻¹ ont été calculées selon les données de la littérature, de l'industrie ou celles de l'année d'étude précédente.

Les EO ont été appliquées manuellement à la volée, sur une largeur légèrement inférieure à la largeur de la butte, préalablement à sa formation (Figure 1). Cela permettait d'éviter que la machinerie n'englobe l'engrais de l'autre parcelle lors de la formation des buttes. La machinerie utilisée pour le façonnage des buttes était une butteuse dérouleuse Rain-Flo 2600 (Dubois Agrinovation). Les EO ont été enfouis à environ 10-15 cm de profondeur par un recouvrement de terre résultant du passage de la butteuse (Figure 2). Le paillis (modèle Horti-300 60'' certifié en culture biologique) et les deux lignes de goutte à goutte (modèle AquaTraxx EA5060834) ont été posés lors de ce même passage. Des vérifications ont été faites afin de s'assurer de la bonne profondeur des tuyaux d'irrigation et un ajustement a été fait au besoin. La transplantation des brocolis a eu lieu la même journée que l'application des fertilisants et la formation des buttes (Figure 3). Les transplants (var *Green Magic*) provenaient d'un producteur biologique de la région de Frelighsburg, les Jardins de Tessa. Un apport d'eau était fait à même le planteur, dans le trou de plantation. Lorsque requis, les transplants ont été repositionnés manuellement dans les trous de plantation, s'assurant ainsi d'un bon contact sol/motte et d'une présence continue de plants sur la butte. Pendant la première semaine suivant la transplantation, les plants morts ou fortement endommagés par des ravageurs ont été changés pour de nouveaux plants sains.



Figure 1. Applications des différents engrais organiques, 17 mai 2021.



Figure 2. Formation des buttes et pose du paillis et des tuyaux d'irrigation, 27 mai 2019.



Figure 3. Transplantation des brocolis, 17 mai 2021.

Dans les jours suivants la transplantation, les différents équipements de mesures (membranes d'échanges ioniques, tensiomètres, sondes TDR, pluviomètre) ont été installés, suivi de la pose des arceaux soutenant le filet anti-insectes sur chacune des buttes d'essai. Les suivis agronomiques, incluant le dépistage des maladies et des ravageurs, ont également débuté à ce moment. Ces suivis ont été réalisés de façon hebdomadaire par le Club Bio-Action et par les intervenants de l'IRDA afin d'effectuer des traitements phytosanitaires ciblés conduisant à l'atteinte de plants matures, en santé et fiables à la prise de données pour la présente étude. De plus, bien que la

culture ait été protégée par des filets anti-insectes, des interventions phytosanitaires ont dû être réalisées puisque ce dernier était fréquemment retiré pour permettre les opérations terrain (changement de membranes, échantillonnages de plants et de sol, apport d'oligo-éléments foliaire, désherbage), laissant une porte d'entrée aux ravageurs. Ainsi, des applications de l'insecticide Entrust SC ont été réalisées en cours de saison (maximum de 3 applications par saison de croissance). Des pièges à cécidomyies ont aussi été ajoutés dans le dispositif afin d'avoir une information supplémentaire sur la pression de ce ravageur. Les différentes mesures de croissance et de suivis ont débuté dès la transplantation des brocolis. Les dates des principales opérations culturales figurent au Tableau 2. Les conditions de température de l'air (°C Max et °C Min) et les précipitations ont été enregistrées à la station météorologique de Saint-Bruno-de-Montarville (CMVH) (Latitude : 45.541378; Longitude : -73.340258) située à proximité des sites d'essai.

Tableau 2. Dates des principales opérations culturales lors des deux années de l'essai.

Opérations	Date	
	2019	2021
Application des engrais organiques	27-mai	17-mai
Façonnage des buttes et transplantation	27-mai	17-mai
Montage du système d'irrigation et début suivi hydrique du sol	27-mai	17-mai
Installation des arceaux	06-juin	31-mai
Traitement #1 Entrust SC	06-juin	31-mai
Pose des filets anti-insectes	06-juin	01-juin
Traitement #2 Entrust SC et application de bore foliaire	19-juin	10-juin
Traitement #3 Entrust SC	03-juil	25-juin
Récolte des brocolis	18-juil	07-juil

2.2 TRAITEMENTS

Quatre traitements de fertilisation étaient comparés dans le cadre de cette étude, soit : un témoin 0N pour connaître la fourniture en N du sol (T1), et trois engrais organiques (EO) apportant une dose visée de 170 kg N ha⁻¹, en totalité à la plantation. Les produits comparés étaient les granules de farine de luzerne (GFL) offertes par l'entreprise Eco-Luzerne située au Lac St-Jean (T2), le compost marin Biosol de la compagnie Fafard (compost) (T3) et les fientes granulées de poules (FGP) de la compagnie Actisol (T4). Aucun coefficient d'efficacité (CE) n'a été appliqué aux différents produits. D'une part, il n'existe aucun CE officiel des produits et le choix d'un CE basé sur le calcul à partir d'équations générales pourrait entraîner un biais dans les résultats. D'autre part, comme le but premier du projet était de comparer l'efficacité des produits, les doses d'apports ne devaient pas être ajustées *a priori* en fonction d'une efficacité présumée. En effet, il n'était pas visé de fournir des quantités similaires de N disponibles (N minéral ou N efficace), mais bien de comparer la part du N_{total} apportée qui deviendra disponible/efficace, donc sous forme de N minéral, pendant la saison de croissance.

2.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET ANALYSES STATISTIQUES

Les traitements étaient répétés quatre fois, selon un plan en blocs complets aléatoires, pour un total de 16 parcelles expérimentales (Figure 4). Les parcelles mesureraient 13 m de longueur par une butte de largeur, où ont été transplantées deux rangées de brocolis en quinconce. En 2019, les buttes étaient espacées de 1,8 m centre-centre. L'espacement entre les plants était de 43 cm et celui entre les rangs sur la butte était de 55 cm, pour une densité de 25 641 plants ha⁻¹. En 2021, les buttes étaient espacées de 1,9 m centre-centre. L'espacement entre les plants était de 43 cm et celui entre les rangs sur la butte était de 45 cm, pour une densité de 24 480 plants ha⁻¹. Aucun rang de garde n'a été mis entre les parcelles, l'espacement entre les buttes étant suffisant pour éviter les effets du traitement adjacent. Toutefois, afin d'éviter les effets de bordure, deux buttes de garde ont été disposées pour encadrer le dispositif. Au total, l'essai comportait donc 6 buttes de 52 m chacune. Pour chaque parcelle, une zone de 3,44 m linéaires était identifiée au centre des parcelles comme zone de récolte. Cette zone contenait 16 plants de brocolis, tous dédiés à être récoltés en fin de saison. Aucun échantillonnage ou mesure de sol, ni de plant, n'ont été effectués dans cette zone pendant la saison afin de ne causer aucun biais sur les rendements.

Toutes les analyses statistiques du projet ont été effectuées avec le logiciel SAS, version 9.4. Les deux années (2019 et 2021) ont été analysées séparément. Une analyse de variance a été réalisée pour chacune des variables à l'étude afin d'étudier les effets des traitements de fertilisation sur ces variables. Un modèle mixte normal a été ajusté avec la procédure PROC MIXED de SAS (Littell et coll., 2006). L'effet fixe du modèle était le traitement et les effets aléatoires étaient les blocs, les rangées et l'erreur résiduelle. Les degrés de liberté ont été calculés avec l'approximation de Kenward-Roger. Dans tous les cas, une analyse graphique des résidus a servi à vérifier les hypothèses sous-jacentes à la validité du modèle. Lorsque l'effet était déclaré significatif par le test de F, les différences entre les moyennes ont été explorées au moyen de tests de t. Ces analyses ont été effectuées séparément à chaque période, sauf pour les membranes d'échange ionique (MEI). Dans cas de l'analyse des MEI, les effets fixes de la période et de l'interaction entre le traitement et la période ont été ajoutés à l'effet du traitement. Enfin, la période était considérée comme un effet de mesures répétées. Une structure de corrélations a été modélisée afin de tenir compte des corrélations entre ces mesures. Une différence de $P \leq 0,10$ a été jugée significative (Amrhein et coll., 2019).

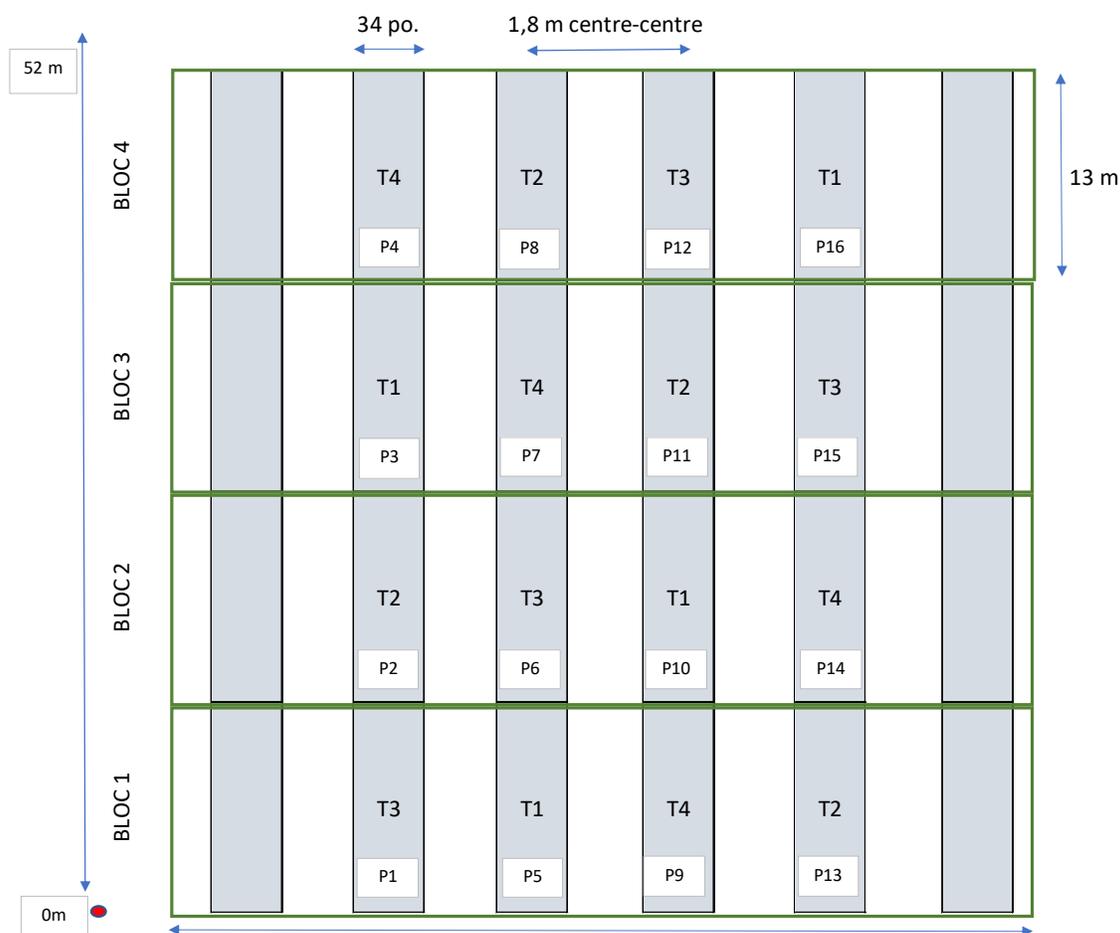


Figure 4. Dispositif expérimental au site d'essai.

2.4 SUIVI HYDRIQUE DU SOL

La connaissance des conditions d'humidité du sol est essentielle pour l'interprétation des processus physico-chimiques ayant cours dans le sol en présence de divers EO. Ainsi, tout au long de la saison, l'état hydrique du sol a été suivi par des équipements de mesure et régulé par des épisodes d'irrigation afin d'obtenir des conditions optimales permettant aux EO d'exprimer leur plein potentiel, sachant que l'eau influence directement l'activité microbienne dans les sols et l'absorption des nutriments par la culture. La teneur en eau volumique a été suivie au moyen de sondes TDR (Time Domain Reflectometry) de modèle CS625 et d'un acquisateur de données CR300 (Campbell Scientific). En 2019, le suivi a été fait uniquement dans la butte du traitement FGP du bloc 2. En 2021, l'accès à un ensemble supplémentaire d'équipement a permis d'effectuer le suivi à deux endroits dans le bloc 2, soit dans la parcelle du traitement FGP et la parcelle du traitement GFL. Dans les parcelles concernées, quatre sondes de teneur en eau ont été positionnées à l'horizontale dans le sens de la butte et réparties uniformément entre les deux rangs de brocolis (Figure 5). L'espacement entre chaque sonde était de 20 cm en 2019 et de 15 cm en 2021. Cette installation permettait la mesure de la teneur en eau à une position latérale précise. Les sondes

TDR ont été identifiées de 1 à 4, la première étant celle du côté nord de la butte et la quatrième, celle du côté sud. Les sondes étant d'une longueur de 30 cm, la mesure correspondait à une moyenne de la teneur en eau sur un peu plus de cette distance. De plus, comme les TDR mesurent l'humidité sur un rayon de 5 cm de part et d'autre, elles ont été insérées à 10 cm de profondeur, permettant ainsi d'obtenir l'humidité sur la strate 5-15 cm de sol. Un pluviomètre (RG3-M) était également branché à l'un des acqui-teurs du site et positionné en bordure du dispositif afin d'assurer un suivi des précipitations pour les deux années et corroborer les données pluviométriques obtenues à la station météo située à proximité de l'essai. De plus, la tension hydrique et la température du sol ont été enregistrées grâce à des modules TX3 de Hortau (Figure 6). Quatre modules étaient installés dans le dispositif, dans le traitement Témoin ON et GFL. Sur chaque module, une sonde de tension et deux sondes de température y étaient connectées. La fréquence d'acquisition des données était toutes les 15 minutes. Les sondes de température étaient installées aux positions correspondantes aux sondes TDR décrites précédemment. Ainsi, les sondes de température dans le traitement Témoin ON correspon-daient aux sondes TDR 3 et 4 et celles dans le traitement GFL correspon-daient aux sondes TDR 1 et 2. Les tensiomètres étaient installés sur une ligne de culture, à proximité d'un plant à 10 cm sous la surface. Les valeurs de tension ont permis d'observer les apports en eau des précipitations et de gérer les épisodes d'irrigation selon les besoins de la culture.



Figure 5. Représentation de l'emplacement des sondes TDR dans la butte (image de gauche) et sondes installées (image de droite), saison 2019.



Figure 6. Module TX3 de Hortau et sondes de température, saison 2019.

2.5 SUIVI *IN SITU* DES MEI

Le suivi *in situ* en continu de la dynamique de l'azote (N-NO_3 et N-NH_4) du sol avec des membranes d'échange ionique (MEI) a été effectué les deux années. Les MEI (anionique AR204-SZRA, cationique CR67-HMR, Ionics Inc., Watertown, MA) captent de façon cumulative tous ions NO_3^- et NH_4^+ se rendant jusqu'à elles. La mesure des flux qu'elles accumulent permet de comparer les délais de libération des engrais et leurs pics de disponibilité. Chaque MEI est insérée dans le sol de façon à couvrir verticalement le milieu de la strate utile (0-20 cm). Trois paires de MEI étaient insérées dans chacune des parcelles, environ à chacun des tiers de sa longueur, toujours entre deux plants de brocoli. Cet emplacement était fixe et ne changeait pas de toute la saison. Aucune MEI n'a été positionnée dans la zone de rendement afin de ne pas perturber les plants de cette zone. Puisque l'essai s'est déroulé dans une culture sur butte plastifiée irriguée, une attention particulière a été portée à l'emplacement des membranes afin qu'elles soient situées à même distance des lignes de goutte à goutte. De plus, le plastique était refermé après chaque changement de MEI avec du ruban adhésif (Figure 7). Les MEI ont été laissées au champ pour une période d'une semaine au départ afin de comparer la libération en N minéral dans les tous premiers jours. Elles ont par la suite été changées aux 14 jours pour créer des périodes consécutives de contact de deux semaines et ce, pour 5 périodes consécutives, soit de la plantation à 65 jours après plantation (JAP). Les analyses ponctuelles de sol sont demeurées toutefois prévues au protocole, car les MEI mesurent des intensités ($\mu\text{g cm}^{-2}$ période $^{-1}$) et ne permettent pas d'établir des quantités d'N par hectare (kg N ha^{-1}) dans le sol. Les trois paires de MEI par parcelle étaient extraites conjointement donnant ainsi une valeur par parcelle.



Figure 7. **Changement des membranes d'échange ioniques au champ, saison 2019.**

2.6 COLLECTE DES DONNÉES

La répartition des échantillonnages de sol et de végétaux est résumée au Tableau 3 (méthodologie, voir sections subséquentes). À chaque printemps, la caractérisation physico-chimique du sol a été effectuée par bloc avant l'établissement du dispositif. En saison, les analyses de sol ont été réalisées par parcelle à des stades cibles basés sur la courbe de prélèvement en N du brocoli de Smith et coll. (2015), soit à 20-25 jours après plantation (JAP), 35-37 JAP et à la récolte à 52 JAP (Figure 8). Les formes labiles de N ($N\text{-NO}_3$, $N\text{-NH}_4$), P et K (P_{eau} , K_{eau}) disponibles à la culture ont été mesurées, de même le carbone labile (C) comme indicateur de santé des sols (C_{eau}). L'activité biologique du sol a été quantifiée par incubation aérobie (0-10 jours et 0-20 jours à température pièce) par la mesure du dégagement de CO_2 (respiration microbienne) et la production de N minéral par minéralisation du N organique. Toutes les analyses ont été réalisées sur des échantillons composites de huit sous-échantillons par parcelle. La masse volumique apparente (MVA) du sol a été déterminée à chacun des échantillonnages afin de pouvoir convertir les ppm en charge (kg ha^{-1}). Les sols ont tous été prélevés sur une profondeur de 0-20 cm, sauf ceux de la récolte 2021 qui ont été prélevés sur la strate 0-30 cm. Le statut nutritionnel a été évalué en saison au stade 8-10 feuilles sur huit feuilles récemment parvenues à maturité dans chaque parcelle. De plus, aux stades cibles (Tableau 3) trois plants entiers (tiges et têtes) sains et représentatifs ont été récoltés par parcelle. Les prélèvements (PLV) ont été calculés en multipliant la masse sèche (MS) de la biomasse par son contenu total en élément N, P, ou K, tel que présenté ci-après en exemple pour le N_{total} :

- $\text{PLV } N_{\text{total}} \text{ plant} = \text{MS plant} \times \text{concentration en } N_{\text{total}} \text{ plant.}$

À la récolte, les têtes et le feuillage résiduel ont été traités distinctement. Ainsi, trois têtes saines ont été conservées par parcelle afin d'être découpées, séchées, puis analysées pour la teneur en NPK totaux. Leur feuillage a également été conservé et le contenu en NPK totaux, analysé. Les exportations (EXP) et les prélèvements ont été calculés tel que présenté pour le N_{total} :

- $\text{EXP } N_{\text{total}} = \text{Rendement}_{\text{total}} \text{ en brocoli (tête) (b.s.)} \times \text{concentration en } N_{\text{total}} \text{ des têtes à la récolte}$
- $\text{PLV } N_{\text{total}} \text{ total en fin de saison} = N_{\text{total}} \text{ exporté par les têtes} + N_{\text{total}} \text{ du feuillage à la récolte}$

Les rendements totaux et vendables ont été déterminés à la récolte finale (Tableau 3). Dans chacune des parcelles, les têtes de brocoli des 16 plants de la zone de rendement ont été prélevées. Le poids total du lot a été noté, puis chacun des brocolis a été pesé individuellement et mesuré au niveau du diamètre de la tête. Les brocolis présentant des dommages de maladies ou d'insectes non récupérables ont été considérés comme déclassés. Les causes conduisant au déclassé étaient les suivantes : tête immature, tête difforme, dommages d'insectes, pourriture molle ou bactérienne sur les têtes, maturité trop avancée (fleurs écloses ou granulé brun). En termes de commercialisation biologique, un brocoli trop petit n'est habituellement pas déclassé. Il est joint à d'autres têtes de brocoli pour former un « bunch ». Cependant, pour visualiser l'impact des traitements sur la grosseur des produits, les têtes ont été classées selon trois calibres, inspirés des normes de classement d'Agricorp, un organisme du gouvernement de l'Ontario (Agricorp, 2021) et lesquels se détaillent ainsi : < 6,4 cm, de 6,4 à 13 cm et > 13 cm (< 2 ½ po, de 2 ½ à 5 po et > 5 po).

En termes de qualité, le Brix, qui est le pourcentage en poids de saccharose dans une solution d'eau pure, a été mesuré deux fois en saison (Tableau 3). Un degré Brix équivaut à 1 % de sucre (OMAFRA, 2021). Au stade 37 JAP, la mesure du Brix a été effectuée sur des feuilles nouvellement matures de brocoli alors qu'à la récolte, le Brix a été mesuré sur les têtes de brocoli. La mesure était effectuée en duplicata dans chacune des parcelles. Dans le cas où les deux mesures présentaient des valeurs trop éloignées, une troisième mesure était effectuée.

Tableau 3. Dates et stades de développement de la culture lors des divers échantillonnages en saison.

Stades :	Dates						
	Plantation		23-25 JAP	37 JAP	44 JAP	Récolte	Post-récolte
2019	27 mai	29 mai	19 juin	03 juil.	10 juil.	18 juil.	31 juil.
2021	17 mai	19 mai	09 juin	23 juin	30 juin	07 juil.	21 juil.
Activités ¹	Sol		Sol	Sol		Sol	
			Plants	Plants	Plants	Plants	
				Brix		Rendement	Brix
-----MEI-----							

¹ Le détail des analyses à chaque stade est décrit à la section 2.6.1

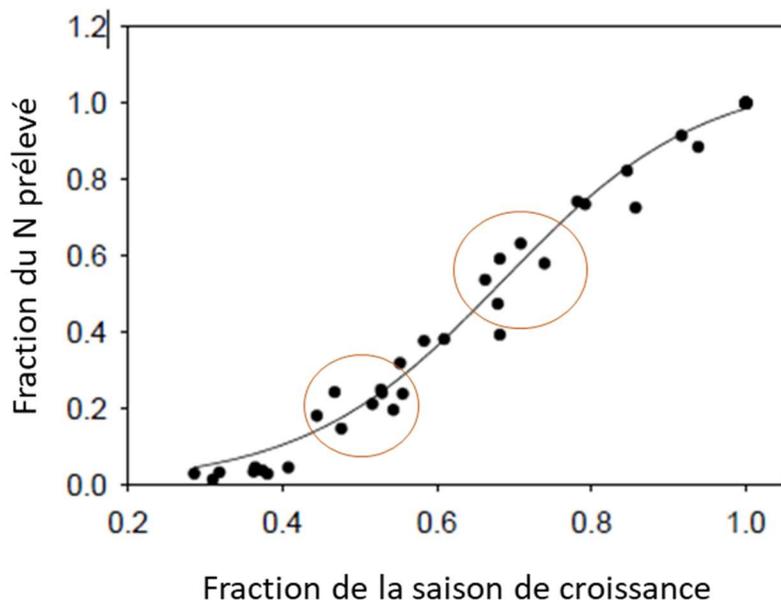


Figure 8. Courbe de prélèvement en N du brocoli d'été, adapté de Smith et coll. (2015).

2.6.1 Méthodes d'analyses

Sol

Lors de chaque échantillonnage, les sols ont été placés dans une glacière et conservés à 4 °C jusqu'à leur préparation au laboratoire. Les éléments majeurs et mineurs ont été extraits dans une solution Mehlich-III (Tran et coll., 1993) et dosés à l'ICP optique. 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. L'analyse granulométrique a été réalisée par la méthode du tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Les contenus du sol en $N\text{-NO}_3$ et $N\text{-NH}_4$ ont été déterminés par extraction au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et dosés par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon) (CPVQ, 1993). L'incubation aérobie a été réalisée à température pièce pendant 10 ou 20 jours afin de mesurer le pouvoir de minéralisation du N organique (production de $N\text{-NO}_3$ et $N\text{-NH}_4$) et la respiration microbienne (dégagement de CO_2) (Fox et Piekielek, 1978; Juma et Paul, 1984). Les contenus en N_{min} ($N\text{-NO}_3$ et $N\text{-NH}_4$) au temps zéro et à la fin de l'incubation ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et dosés par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon) (CPVQ, 1993). Le CO_2 dégagé a été capté par une éprouvette contenant 10 mL d'une solution de NaOH 1N sous la forme de Na_2CO_3 . La consommation de NaOH est ensuite déterminée par titration acidimétrique à l'aide d'une solution de HCl 1N. En 2021, à la récolte, l'incubation a été poursuivie 10 jours supplémentaires afin d'avoir un aperçu du pouvoir de minéralisation sur le plus long terme. Le P soluble à l'eau (P_{eau}), a été déterminé conformément à la méthode Sissingh (1971) et le K soluble à l'eau (K_{eau}) a été déterminé par spectrométrie d'émission au plasma sur la solution obtenue pour le P_{eau} . Enfin, le carbone soluble à l'eau (C_{eau}), nommé C labile, a été dosé selon la méthode de Garcia et coll. (1990).

Engrais organiques

Les trois engrais organiques (EO) ont été caractérisés au niveau physico-chimique, les deux années, pour le pH_{eau} et le taux de matières sèches à 105 °C (%) (Recommended Methods of Manure Analysis, Peters et coll., 2003). Le carbone organique total (C_{total}) 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 pour avoir le C (Giroux et Audesse, 2004). Le N_{total} a été extrait selon la méthode NTK et dosé par colorimétrie automatisée SEAL (CPVQ, 1993). Comme le NTK ne mesure pas le nitrate, les ions $N\text{-NO}_3$ et $N\text{-NH}_4$ ($N_{\text{minéral}}$) ont été extraits aux KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et analysés par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon) (CPVQ, 1993). Le contenu en $N\text{-NO}_3$ a été additionné au N_{NTK} pour avoir le N_{total} . Le carbone labile (C_{eau}) a été évalué par le C organique soluble à l'eau suivant sa mesure sur un extrait centrifugé auquel du HCl a été ajouté pour libérer le C inorganique (Garcia et coll., 1990). Le P soluble à l'eau (P_{eau}) a été déterminé sur un filtrat obtenu par centrifugation puis analysé par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon) (CPVQ, 1993). Le K soluble (K_{eau}) a été déterminé par spectrométrie d'émission au plasma sur la solution obtenue pour le P soluble à l'eau. Le P_{total} a été mesuré par digestion à l'acide sulfurique (voie humide) (Isaac et Johnson 1976), suivie d'une détermination par spectrométrie d'émission au plasma tout comme les contenus en potassium (K), calcium (Ca) et magnésium (Mg). Le contenu en P du sol excluant le P récalcitrant a été extrait au HCl 2,5N (P_{HCl}) (Salomons et Gerriste, 1981), puis déterminé par colorimétrie automatisée SEAL. L'indice de stabilité biologique (ISB) a été mesuré selon la méthode décrite dans Landry et coll.

(2011) adaptée de L.E. Parent (2005) de la méthode originale AFNOR (XP U44-162) utilisant un digesteur de fibre (ANKOM 200) de la compagnie ANKOM Technology.

Membranes d'échanges ioniques

Avant leur emploi au champ, les MEI anioniques et cationiques ont été nettoyées par agitation dans une solution de HCl 0,5M en séquences de 30 minutes. Elles ont ensuite été rincées trois fois à l'eau déminéralisée, avec un brassage de 30 secondes entre chaque rinçage, pour enlever toute trace d'acide. Puis elles ont été saturées par agitation dans une solution de NaHCO₃ 0,5M, changée aux heures sur une période de 5 heures. Les MEI ont ensuite été à nouveau 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/parcelle ont été nettoyées à l'eau déminéralisée, puis placées dans le même tube d'extraction contenant 40 ml d'une solution de KCl 2M. Pour chacun des éléments, les données représentent donc la valeur moyenne des trois MEI/parcelle. De retour au laboratoire, les tubes ont été agités 30 minutes, puis le N-NO₃ et N-NH₄ de la solution dosée par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon). Les flux sont exprimés par unité de surface de MEI (recto-verso) et par période. Les unités sont donc en µg cm⁻² période⁻¹.

Végétaux

Les échantillons de biomasses (feuilles et plants) ont été conservés dans une glacière à 4 °C avant d'être mis à sécher à 65°C et broyés à 100 mesh. Le contenu en N_{total} a été dosé par combustion LECO. Les autres éléments majeurs (P, K) et mineurs (Ca, Mg, Na) ont été analysés 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. 1991). L'indice Brix a été mesuré par réfractométrie (réfractomètre portatif modèle Hanna numérique HI96801). Les équipements étaient nettoyés, rincés à l'eau déminéralisée et essuyés entre chacune des mesures.

2.6.2 Calcul du taux d'utilisation apparent (TUA) du N

Dans la pratique, il est possible de calculer le coefficient d'efficacité azoté (CEN) d'un engrais organique en comparant son taux d'utilisation apparent (TUA) du N à celui de l'engrais minéral. Cependant, dans le cadre de la présente étude situé sur un site en régie biologique, il n'était pas possible d'utiliser un engrais minéral et donc, de calculer les CEN. Cependant, les TUA des différents EO ont pu être calculés. Le TUA se calcule en comparant les prélèvements en N des plants fertilisés et non fertilisés (Témoin ON). Par soustraction, la quantité de N prélevé en plus par les plants fertilisés est considérée comme provenant apparemment des engrais. Le TUA a été calculé selon l'équation de Giroux et coll. (2007) :

$$\text{TUA Engrais organique (\%)} = \frac{\text{Prélèvement N du traitement EO} - \text{Prélèvement N témoin ON}}{\text{Dose de N}_{\text{total}} \text{ apportée par l'EO}}$$

Pour avoir un TU réel en contexte de production, la méthode demande d'utiliser de l'azote-15 (¹⁵N) qui permet hors de tout doute de savoir la part de N prélevé qui vient de l'engrais. Cette méthode est cependant coûteuse et n'a pas été appliquée pas dans le cadre de la présente étude.

2.7 ANALYSE COÛTS-BÉNÉFICES

Afin d'estimer le potentiel de gains au niveau économique de l'usage des différents engrais organiques (EO), une évaluation de la marge de production (différence bénéfices-coûts) a été réalisée à chaque année d'essais. Les frais proviennent des fournisseurs et de la référence économique du CRAAQ pour le brocoli biologique (AGDEX 252.19/821, 2017). Les coûts des EO ont été estimés pour des apports équivalents de $170 \text{ kg N}_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$, mais sur une superficie de $1\,000 \text{ m}^2$, puisque cette dernière s'avère plus représentative des superficies cultivées par un producteur biologique maraicher diversifié. Les autres frais (semences/transplants, machinerie, produits/équipements phytosanitaires, irrigation, main-d'œuvre) ont été considérés équivalents entre tous les traitements puisque seul l'usage des EO variait.

Le calcul des bénéfices (revenus) a été effectué en fonction des calibres de brocolis (diamètre de la tête du brocoli) obtenus avec chaque traitement. À la suite de discussions avec des conseillers agricoles et des producteurs, le prix de vente moyen d'un brocoli bio directement à la ferme a été utilisé et il a été fixé en moyenne à $4,00 \text{ \$/brocoli}$. Lorsque les brocolis sont de calibre inférieur à 13 cm (soit la catégorie $6,35 \text{ à } 13 \text{ cm}$), les plus petits de la catégorie sont parfois combinés en paquet de 2 et vendus au même prix qu'un plus gros brocoli. Pour représenter cette réalité, un prix moyen de $3,00 \text{ \$/brocoli}$ a alors été appliqué à cette catégorie. Enfin, pour les brocolis avec un diamètre de la tête inférieur à $6,35 \text{ cm}$, ceux-ci sont toujours vendus en paquet de 2 et un prix de $2,00 \text{ \$/brocoli}$ a été appliqué à cette catégorie.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 DISPONIBILITÉ EN EAU, HUMIDITÉ DU SOL ET T° SOL ET AIR

Le suivi des conditions météorologiques aux sites d'essai pour les deux années sont présentées à la Figure 9 et à la Figure 10. En moyenne, les deux saisons de production (mai- fin juillet) ont eu des températures similaires à partir de la fin juin car le début de saison de 2019 a été sensiblement plus frais. Les mesures de température du sol indiquent d'ailleurs que les sols étaient jusqu'à 10 °C plus froids en début de saison 2019 (Figure 11). Les températures plus fraîches s'expliquent probablement par le temps plus gris prévalant en 2019. En effet, la saison 2019 a été beaucoup plus pluvieuse, avec 311 mm de précipitations au total réparties sur 57 épisodes, comparativement à 137 mm réparties sur 23 épisodes en 2021. Malgré cela, le suivi de la tension en eau du sol des buttes avec les tensiomètres TX3 (Figure 12) indique que la disponibilité en eau a été plus basse en 2019. En effet, lors de la 1^{ère} saison, il a été difficile à partir du mois de juin de maintenir les valeurs de tension sous le seuil de déclenchement des irrigations de 25 kPa et ce, malgré de fréquents épisodes d'irrigation de 30 à 45 minutes. Ces conditions ont pu être observées dans l'ensemble des parcelles suivies, suggérant que cette situation était généralisée pour l'ensemble du dispositif. Cela a probablement occasionné des périodes de stress hydrique à la culture puisqu'en conditions sèches, le transport latéral de l'eau dans le sol est moins favorisé. Les flux d'ions nitrate mesurés sur les membranes d'échange ionique (MEI), plus faibles en 2019 qu'en 2021, appuient cette hypothèse (Figure 14). En effet, pour atteindre les MEI, les ions doivent migrer dans la solution du sol. Il se peut aussi que l'activité biologique ait été réduite en partie. Cela dit, les flux démontrent bien que cela n'a pas empêché les processus de minéralisation de se produire. De même, les rendements de 2019 étaient quand même inférieurs à ceux de 2021, sans toutefois empêcher la comparaison des produits puisque les rendements atteints avec les plants fertilisés dépassaient largement le rendement du témoin ON. En 2021, pour favoriser un meilleur contrôle, les apports d'eau d'irrigation ont donc été fractionnés en deux périodes de 20 minutes, ou parfois trois périodes de 15 minutes. Les valeurs de tension du sol ont ainsi pu être maintenues sous une valeur de 10 kPa pour une majorité de la saison dans l'ensemble des parcelles suivies (Figure 12), indiquant que malgré une saison plus sèche, les conditions hydriques du sol n'étaient pas limitantes.

Les mesures de teneur en eau prises par les TDR corroborent celles des tensiomètres, soit que les conditions hydriques du sol des buttes étaient plus sèches en 2019 (Figure 13). En 2021, les mesures TDR permettent aussi de comparer la teneur en eau du sol selon les EO, soit pour les FGP comparativement aux GFL (Figure 13). On y distingue nettement que les sols fertilisés avec les FGP ont une teneur en eau inférieure aux sols fertilisés avec les granules de luzerne (GFL). Le développement plus grand des plants fertilisés aux FGP explique probablement cette différence, car des plants plus gros avec une croissance plus active créent un appel d'eau plus important (Figure 17). Ainsi, il ne semble pas que les GFL aient créé des conditions hydriques moins favorables malgré qu'elles soient reconnues comme très hygroscopiques.

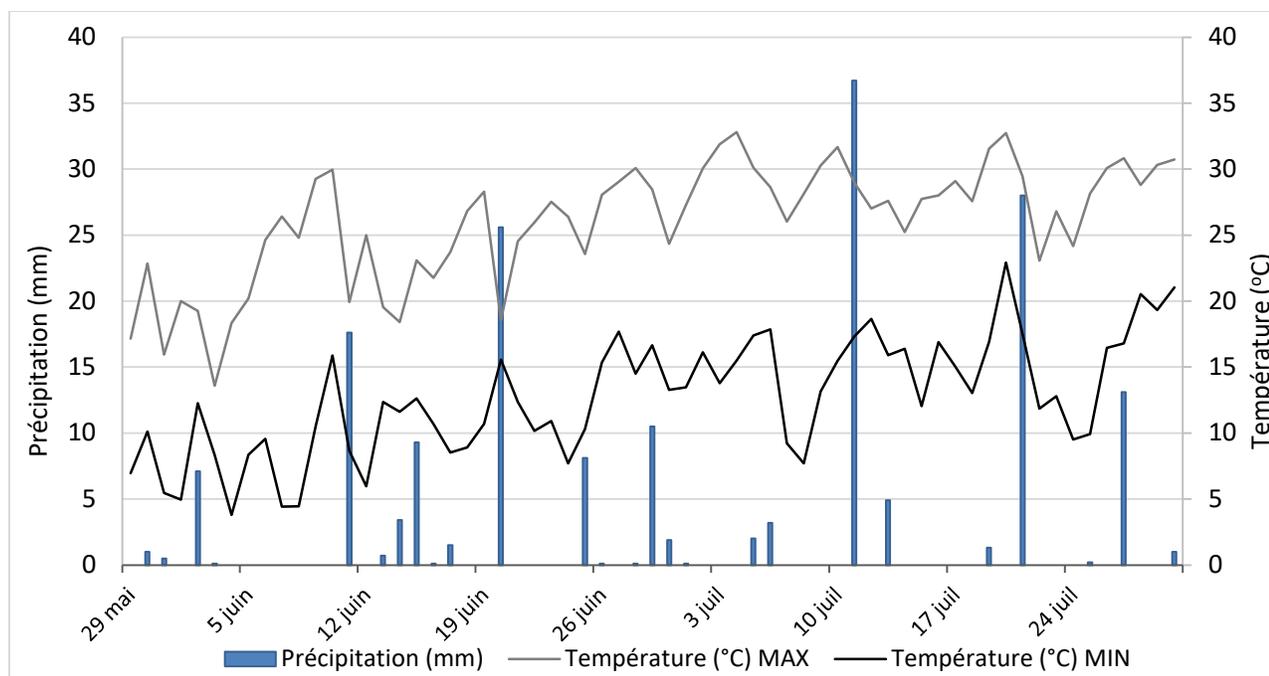


Figure 9. Données climatiques au site d'essai pour la saison de croissance 2019.

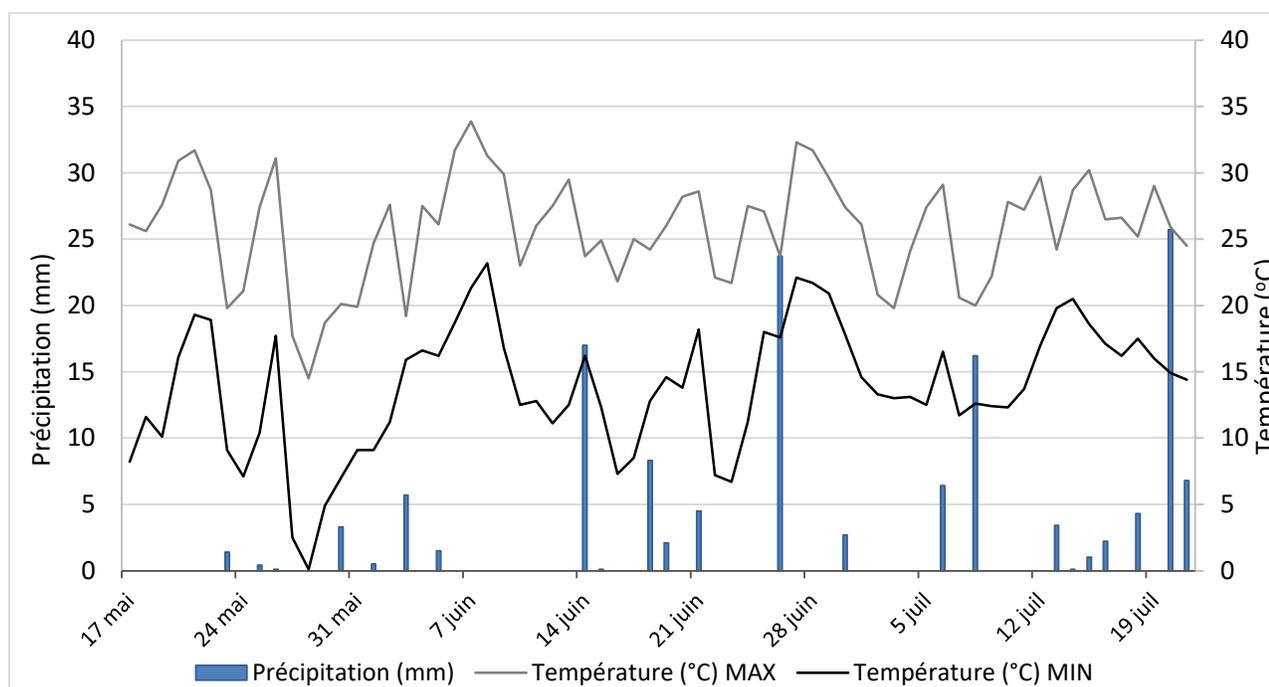


Figure 10. Données climatiques au site d'essai pour la saison de croissance 2021.

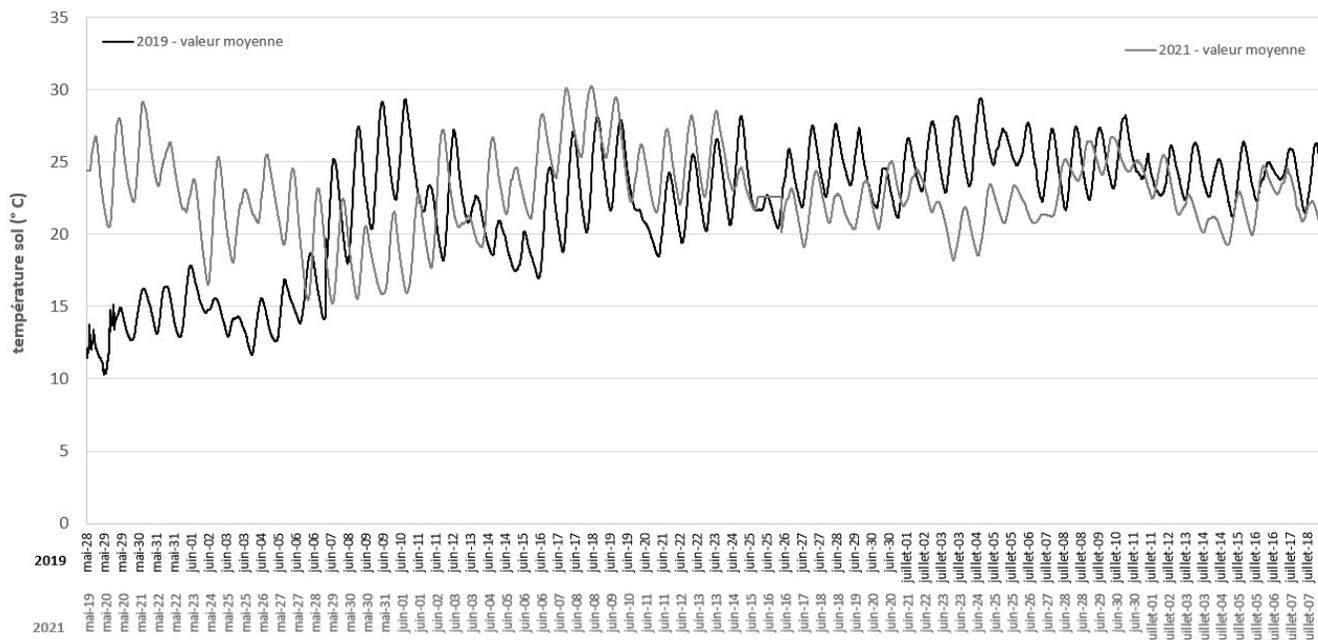


Figure 11. Suivi de la température (°C) du sol (moyenne des huit sondes), saisons 2019 et 2021.

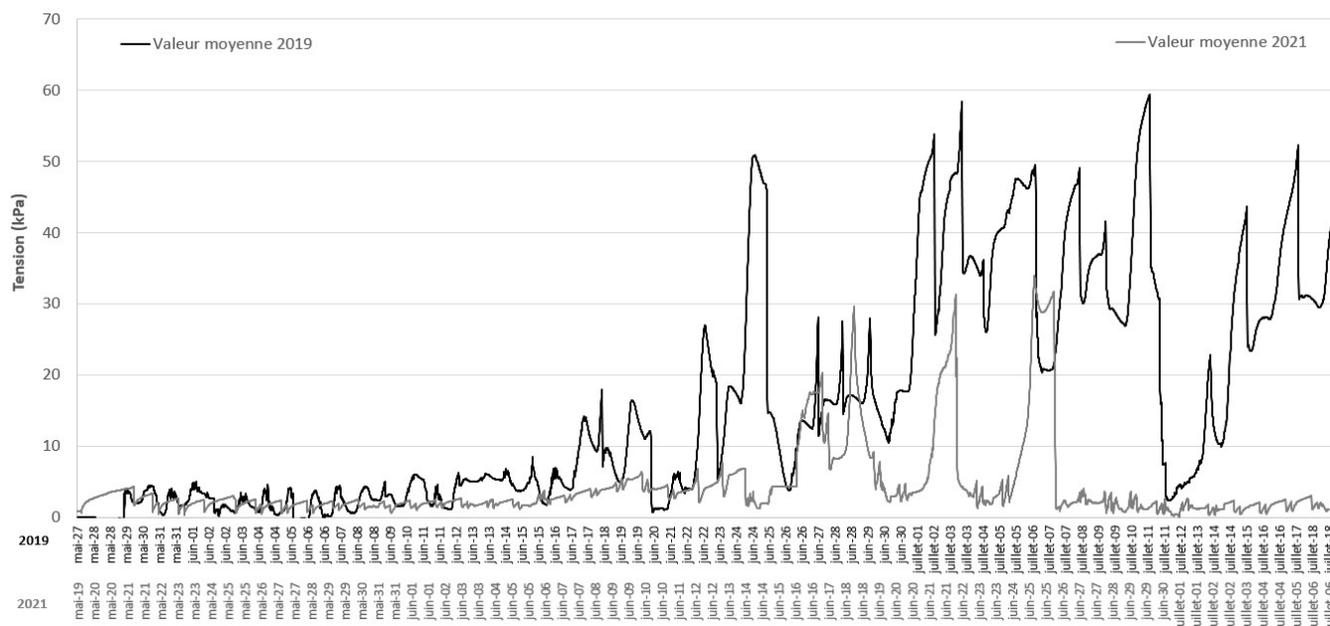


Figure 12. Suivi de tension en eau (kPa) du sol (moyenne des quatre tensiomètres), saisons en 2019 et 2021.

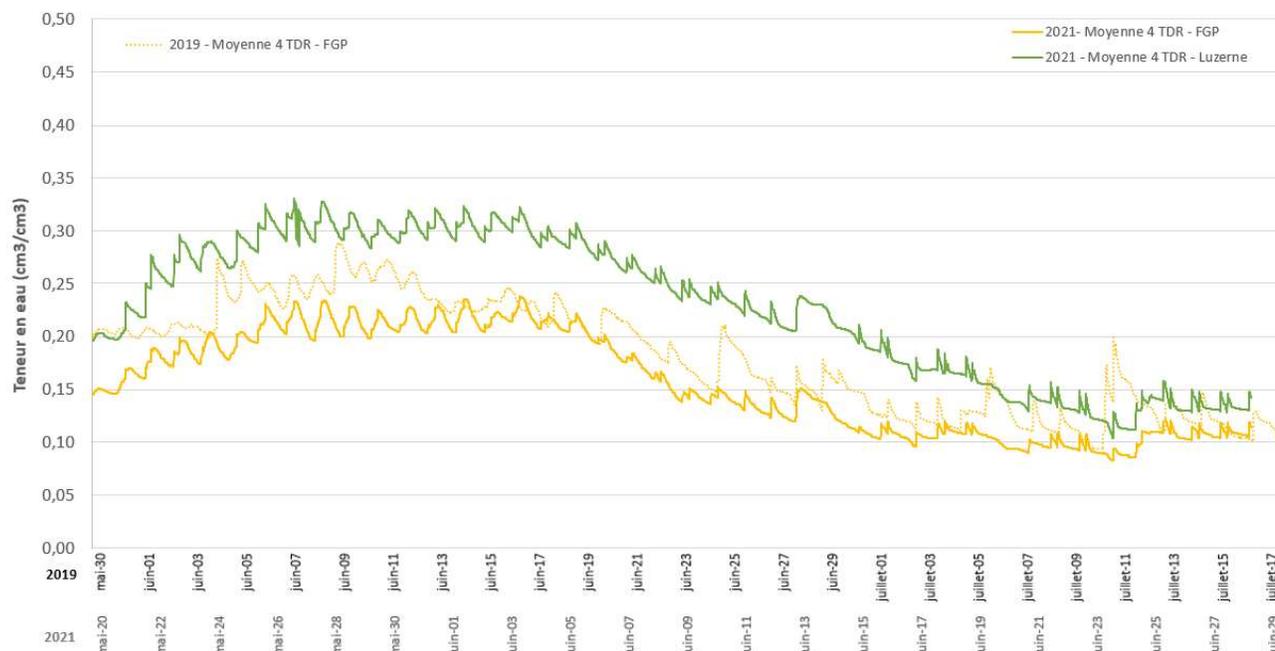


Figure 13. Suivi de la teneur en eau volumique (cm^3/cm^3) du sol, mesurée par les TDR, saison 2019 et 2021.

3.2 CARACTÉRISATION PHYSICO-CHEMIE DES ENGRAIS ORGANIQUES EN TERMES D'ÉLÉMENTS FERTILISANTS ET DE CONTENU CARBONÉ

La caractérisation des EO révèle que la composition en N_{total} des produits s'approchait des moyennes (données antérieures ou de l'industrie) utilisées pour calculer la cible de $170 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$. Seules les analyses des GFL en 2019 et du compost marin en 2021, présentaient des valeurs légèrement inférieures à celles attendues, de 15 % (Tableau 4). Ainsi, en 2019, les GFL ont apporté $143 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$, soit 82 à 87 % des apports (moy. 85 %) des FGP et du compost, respectivement, apportant de leur côté en moyenne $170 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$. En 2021, les GFL et les FGP ont apporté une dose similaire moyenne de $172 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$, mais le compost a fourni une dose de 16 % inférieure. Cet aspect a été considéré lors de l'analyse ultérieure des résultats. Cela dit, les résultats obtenus pour chaque produit, similaires les deux années, démontrent que ces différences d'apports n'ont pas modifié les conclusions globales à tirer des divers produits.

Tableau 4. Apports réels en N, P_2O_5 et K_2O à l'hectare provenant des engrais organiques appliqués.

Traitements ¹	2019				2021			
	N_{total}	P_2O_5	K_2O	Quantité	N_{total}	P_2O_5	K_2O	Quantité
	kg ha^{-1}			T ha^{-1}	kg ha^{-1}			T ha^{-1}
Compost	165	211	165	15,0	145	145	145	14,6
GFL	143	31	131	6,2	174	42	188	7,0
FGP	175	111	92	3,8	170	111	90	3,5

¹ Compost : compost marin; GFL : granules de farine de luzerne; FGP : fientes granulées de poules.

Les principales propriétés physico-chimiques des EO sont résumées au Tableau 5. Tant les contenus que les ratios entre les éléments sont importants à considérer. En effet, un EO moins riche en éléments par kilo, mais de composition équilibrée, pourra être apporté en plus grande quantité (ex. contenu inférieur en N mais ratio N/P équivalent à celui d'un produit plus riche en N). Selon si le coût du kilo est en conséquence, il peut donc être tout aussi intéressant qu'un produit plus riche, mais plus coûteux. De plus, la richesse en nutriments majeurs n'est pas le seul aspect à considérer. Par exemple, le carbone, en quantité et en résistance (facilité à la minéralisation), est un aspect primordial puisqu'il joue un rôle dans la structuration des sols et l'activité biologique des sols.

Selon les analyses, le compost se révèle tout d'abord être deux fois plus humide que les deux autres EO, ce qui était attendu puisque celui-ci est un produit vendu en sac, tandis que les deux autres sont des produits granulés. Ainsi, sur base humide (b.h.) telles qu'utilisées, les FGP présentent le contenu en N_{total} le plus élevé, soit 2 fois plus que celui des GFL et 4,5 fois plus que celui du compost. Cependant, c'est également les FGP qui présentent la plus forte teneur en P, soit 5 fois plus que celle des GFL et 2,5 plus que celle du compost. Étant donné son fort contenu en N_{total} , cela lui confère tout de même un ratio N_{total}/P_{total} plus élevé (3,6) que celui du compost (2,0), pénalisé par son plus faible contenu en N_{total} , mais un ratio beaucoup moins élevé que celui des GFL (9,2). Les GFL présentent ainsi une composition intéressante qui combine un faible ratio N/P et un contenu intermédiaire en N_{total} . D'autres sources rapportent également des contenus en N_{total} d'un même ordre de grandeur pour des GFL (2,67-3,06 %; Qian et coll. 2008; 2,9%, Malhi et coll. 2013). De plus, le contenu en K des GFL est équivalent à celui des FGP, tous deux fortement plus concentrés en K que le compost. Cependant, le contenu en K des GFL est à près de 100 % sous forme soluble (K_{eau}/K_{total}), tandis que celui des FGP l'est à 70 %. Le ratio N_{total}/K_{total} des GFL est ainsi de 1,3, ce qui est intéressant au regard du ratio des apports à combler pour une majorité de cultures pour ces deux éléments. Le compost présente un ratio N_{total}/K_{total} similaire, mais son ratio N_{total}/P_{total} fait en sorte qu'il conviendrait davantage à des cultures non nitrophiles pour lesquelles le K est important. Le ratio N_{total}/K_{total} des FGP, du double de celui des GFL, pourrait entraîner un manque de K en sol pauvre en cet élément lorsque les apports sont basés sur les besoins en N, mais devient un avantage en sol riches en K où les apports demandés en K sont fortement réduits. En termes de contenus totaux en N-P₂O₅-K₂O (b.h.), les formulations des produits sont :

GFL : 2.5 - 0.6 - 2.4 ; FGP : 4.8 - 3.1 - 2.5 ; Compost : 1.1 - 1.2 - 1.1.

Les GFL sont aussi le produit apportant par tonne appliquée au sol le plus de matière organique (906 kg T⁻¹), mais aussi le plus de carbone (C) labile, ce qui lui confère le plus haut ratio C_{eau}/C_{total} (21 %) (Tableau 5). Le C labile est important car il est la seule source d'énergie des microorganismes du sol. Les FGP, reconnues pour être un produit très réactif dans les sols (Landry et coll., 2019) apportent 1,5 fois moins de carbone par tonne appliquée que les GFL, mais présentent un ratio C_{eau}/C_{total} très similaire (18 %). À l'opposé, le contenu en C_{eau} du compost est de près de 0, ce qui est attendu avec ce type de produit, mature, dont les bénéfices se traduisent davantage dans l'apport de carbone résistant, important pour le maintien d'une bonne structure des sols. La mesure de 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, appuie ce résultat. Les ISB des GFL et des FGP sont en effet très bas (ISB : 12), ce qui dénote que le produit se comportera davantage comme un engrais, tandis que l'ISB du compost est 3 fois plus élevé (ISB : 45), indiquant qu'il s'agit d'un produit plus mature, dont la dégradation des éléments plus labiles a déjà eu majoritairement cours, et qui se modifiera ultérieurement beaucoup plus lentement. Les GFL présentent

tout de même un C/N de 17, similaire à celui du compost (C/N : 14), et 2,5 fois plus élevé que celui des FGP. Cette valeur est cependant bien en-deçà de la valeur de 30 (CRAAQ, 2010) au-dessus de laquelle il y a risque d'immobilisation. Au global, en combinant les informations fournies par l'ISB, le C_{eau} , le N_{total} et le ratio C/N, les GFL devraient être dégradables relativement facilement dans les sols, à l'image des FGP, et produire une quantité intéressante, quoique moindre de N disponible, que les FGP. Le contenu en C_{eau} plus élevé des GFL contribuera à réduire l'impact de leur C/N plus élevé. Il pourrait donc y avoir un délai de libération, mais la stimulation de l'activité biologique des sols et le faible ISB devraient permettre au produit de relâcher par minéralisation un pic de nitrate dans un délai similaire aux FGP, mais de moindre ampleur. De son côté, le compost devrait être moins réactif, libérant dès le départ son contenu en éléments déjà présents sous une forme disponible, mais sans produire de grand pic de minéralisation et plutôt constituer une réserve en nutriments et carbone sur le plus long terme. Les flux de $N\text{-NO}_3$ obtenus par suivi *in situ* avec les membranes d'échanges ioniques (MEI, section 3.3) appuient d'ailleurs cette interprétation des résultats.

Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques des engrais organiques.

Paramètres ¹	Moyennes 2019 - 2021		
	GFL ²	Compost	FGP
pH_{eau}	6,1	7,3	7,3
Matière sèche (%)	92	42	90
CONTENUS (kg T⁻¹)			
N_{total}	25	11	48
$N\text{-NO}_3$	0,24	0,83	0,07
$N\text{-NH}_4$	0,28	0,35	1,53
N minéral (N_{min})	0,52	1,18	1,60
P_{total}	2,7	5,3	13,4
P soluble (P_{eau})	1,4	0,6	1,1
K_{total}	20	9	21
K soluble (K_{eau})	20	5	15
Ca_{total}	12	26	51
Mg_{total}	1,9	2,7	5,0
Matière organique (MO)	906	643	728
C_{total}	453	321	365
C labile (C_{eau})	97	2	65
C résistant	352	318	294
RATIOS			
$N_{\text{min}} / N_{\text{total}}$	0,02	0,11	0,03
$P_{\text{HCl}} / P_{\text{total}}$	0,5	0,9	0,6
$P_{\text{eau}} / P_{\text{total}}$	0,5	0,1	0,1
$K_{\text{eau}} / K_{\text{total}}$	0,9	0,6	0,7
$N_{\text{total}} / P_{\text{total}}$	9,2	2,0	3,6
$N_{\text{min}} / P_{\text{total}}$	0,2	0,2	0,1
$N_{\text{total}} / K_{\text{total}}$	1,3	1,2	2,3
$C_{\text{eau}} / C_{\text{total}}$	0,21	0,01	0,18
C/N	17	14	7
ISB (%)	12	45	12

¹ Paramètres sur base tel que reçu, excepté pour la MS, MO et C_{total} qui sont en base sèche.

² GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

3.3 DÉLAI ET INTENSITÉ DE FOURNITURE EN NITRATE SUR LA SAISON

Les deux années, la fertilisation a fortement influencé les flux de N-NO₃ (2019 : Ferti à $P = 0,0007$; 2021 : Ferti à $P = 0,0005$) et de N-NH₄ (2019 : Ferti à $P = 0,0113$; 2021 : Ferti à $P = 0,0058$). Cependant, ces derniers ont été mineurs (données non illustrées). En fait, les flux de N-NH₄ sont pratiquement nuls dans les sols témoins et demeurent très inférieurs aux flux de N-NO₃ dans les sols fertilisés et ce, tout au long de la saison (N-NH₄; moy. 1,1 et 4,7 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ période}^{-1}$ en 2019 et 2021, respectivement) (N-NO₃; moy. 33,9 et 53,7 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ période}^{-1}$ en 2019 et 2021, respectivement). Les ions N-NH₄ ont principalement été captés dans la semaine suivant l'application des EO, et ce dans les sols fertilisés avec les FGP (2019 : 12,1 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ période}^{-1}$; 2021 : moy. 42,7 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ période}^{-1}$). Ceci concorde avec le fait que cet EO contient davantage de NH₄ que le compost (4x plus) et les GFL (6x plus). Cela dit, le contenu en N-NH₄ des FGP demeure mineur (1,5 kg T^{-1} ; 3,2 %) en comparaison au N_{total} (Tableau 5). Il semble donc que les N-NH₄ captés provenaient de ceux déjà présents dans le EO au moment de leur application, contrairement aux flux de N-NO₃ qui semblent produits tout au long de la saison, probablement par minéralisation du N organique. Les ions N-NO₃ apparaissent donc comme étant la principale source de N disponible aux plants de brocolis. Les flux de ceux-ci ont été fortement influencés par le type d'EO utilisé pour fertiliser les buttes dont le comportement diffère selon la période de mesure (2019 : Ferti x Période à $P < 0,0001$; 2021 : Ferti x Période à $P = 0,0010$) (Figure 14).

Dans la semaine (7 jours) suivant l'application des EO dans la butte, ce sont les flux de N-NO₃ du compost qui sont les plus élevés (1,3 à 5,6 fois) ($P = 0,0054-0,0153$) les deux années. En 2021, la différence est non significative avec les FGP ($P = 0,2611$), mais rappelons que la dose d'apport du compost avait été sous-estimée (145 vs. 170 $\text{kg N}_{\text{total}}$). Dans le cas des FGP pour lesquels la dose d'apport correspondait à celle visée les deux années, les flux n'ont été augmenté qu'une saison sur deux en comparaison du sol témoin ON. Toujours dans la semaine suivant l'application des EO, en ce qui a trait aux GFL, ceux-ci n'ont pas occasionné de hausse des flux de N-NO₃ en comparaison au sol témoin et cela les deux années. En 2019, les flux tendaient même à être 1,5 fois sous ceux du sol témoin. Ceci suggère fortement qu'il y a un délai de libération par la minéralisation et peut-être même de l'immobilisation. Ceci concorderait avec la caractérisation chimique du produit et les résultats de l'incubation de sol effectué en début de saison 2019 (Tableau 7) qui indiquent un caractère immobilisant du produit puisque le contenu en nitrate du sol tend à diminuer plutôt qu'à augmenter lors de l'incubation de sol (section 3.4). Le compost semble toutefois relâcher les éléments déjà disponibles qu'il contient au moment de l'application au sol car dans les deux semaines qui suivent, les sols avec compost présentent peu ou pas de hausse des flux les deux années et ceux-ci s'abaissent rapidement par la suite. En fait, les flux de N-NO₃ du compost sont statistiquement supérieurs à ceux du sol témoin uniquement dans les premières périodes (1^{ère} et 2^e période en 2019, 1^{ère} période en 2021). Le reste du temps, ils sont équivalents à ceux mesurés dans le sol témoin non fertilisé. Ceci concorde avec la caractérisation biochimique du produit qui indiquait que le compost est un produit mature et résistant à la minéralisation, qui libérerait les éléments déjà disponibles lors de son application mais n'en produirait pas davantage par la suite. À l'opposé, les GFL et FGP, semblent minéraliser activement et produisent une remontée marquée des flux de N-NO₃ les deux années de 7 à 21 jours post incorporation (2^e période). En 2019, la hausse est similaire pour les deux produits (5 fois), tandis qu'en 2021, les GFL présentent une hausse plus élevée (3,3 fois) que celle des FGP (2,5 fois). Cependant, les deux années, les flux des FGP atteignent des valeurs plus élevées que

ceux des GFL (2019 : 1,7x; 2021 : 1,4x). La différence est plus marquée en 2019, mais il faut rappeler que l'apport de GFL a été inférieur à celui visé, ce qui a donné un apport de N_{total} de 15 % inférieure avec les GFL, en comparaison des fientes de poules (143 vs. 175 kg $N_{\text{total}}T^{-1}$). Toutefois, cette différence n'explique pas l'importance de l'écart entre les deux EO. D'ailleurs, en 2021, les quantités d'apports sur base de N_{total} étaient les mêmes et les flux des GFL demeurent inférieurs à ceux des FGP. Cependant, un ajustement du placement des goutteurs qui a permis d'humecter plus rapidement et uniformément le sol de la butte semble avoir profité à ces deux produits de haut potentiel minéralisable, mais qui ont un taux de MS très élevé au départ (> 90 %). En effet, si les flux pour le compost sont de même ordre de grandeur les deux années, ceux des GFL et des FGP présentent des moyennes saisonnières beaucoup plus élevées en 2021.

Suivant la hausse des prélèvements par la culture (au-delà de 25 JAP), les flux de $N\text{-NO}_3$ s'abaissent pour tous les EO, et même dans le sol témoin. La baisse est d'autant plus marquée que les EO semblent moins aptes à produire rapidement du $N\text{-NO}_3$ par minéralisation. Ainsi, les diminutions sont les plus grandes pour le compost (2019 : 17x; 2021 : 9,2x), suivi des GFL (2019 : 3,6x; 2021 : 7,8x) et des FGP (2019 : 1,2x; 2021 : 2,2x). Au final, les FGP produisent des flux supérieurs et les maintiennent sur une plus longue période que les autres produits. En 2021, à partir de la récolte (en absence de prélèvement par la culture), l'ensemble des flux subissent toutefois une remontée, particulièrement ceux des GFL (9x), dont les flux de $N\text{-NO}_3$ sont les seuls à être significativement supérieurs à ceux du sol témoin. Ainsi, une fois les plants récoltés, le NO_3 s'accumule dans les sols avec GFL suggérant que leur taux de production de NO_3 en présence de prélèvement actif est insuffisant pour maintenir des flux aussi élevés que ceux des FGP, mais qu'il y a encore un potentiel de production intéressant sur le plus long terme. Les résultats de l'incubation de sol échantillonnés à la récolte corroborent cette hypothèse (Tableau 14). En effet, après 10 jours d'incubation en 2019 et 20 jours d'incubation en 2021, les sols fertilisés aux GFL produisent 1,35 et 1,7 fois plus de $N\text{-NO}_3$, respectivement, que ceux fertilisés au compost et FGP qui présentent un potentiel équivalent.

Au global, les EO se comportent donc tel que prédit sur la base de leurs propriétés physico-chimiques (Tableau 5). Le compost semble être un produit stable, qui libère au départ son contenu en éléments déjà disponibles, mais sans en générer significativement de nouveaux. Il n'arrive donc pas à soutenir le prélèvement en $N\text{-NO}_3$ des plants. À l'opposé, les GFL et les FGP réagissent intensément (variation rapide et élevée) et une meilleure humectation de la butte leur a été favorable en 2021. Les flux de $N\text{-NO}_3$ atteignent cependant des valeurs supérieures et sont maintenus sur le plus long terme avec les fientes de poules, même à apport égal de N_{total} . Cela indique un plus grand potentiel de production de nitrate pour les FGP, d'autant plus que les flux supérieurs de nitrate ont été mesurés même si ces parcelles ont aussi connu des prélèvements 2,1 à 2,6 fois plus élevés que les parcelles avec GFL et compost (Tableau 9, Tableau 10). La performance des GFL est tout de même à souligner puisqu'ils ont produit des flux de $N\text{-NO}_3$ maximum valant 60 % et 70 % de ceux des FGP. De plus, les GFL présentaient un potentiel supérieur de production de NO_3 en post-récolte, indiquant que la problématique est davantage au niveau de la vitesse de minéralisation du N organique. Cet aspect est davantage pénalisant dans le cas d'une culture comme le brocoli dont la croissance est rapide, le cycle de production court et les besoins en N élevés. Ces résultats devraient être exploités dans la mise au point du mode d'apport des GFL, car ils suggèrent qu'un délai plus grand entre l'incorporation des GFL dans la butte et la plantation des brocolis serait bénéfique. Un meilleur

parti serait aussi probablement tiré des propriétés des GFL avec une culture dont la vitesse de croissance est plus lente et le pic de prélèvement plus tardif. Un usage mixte FGP - GFL, dont le ratio serait à établir, pourrait aussi être très gagnant.

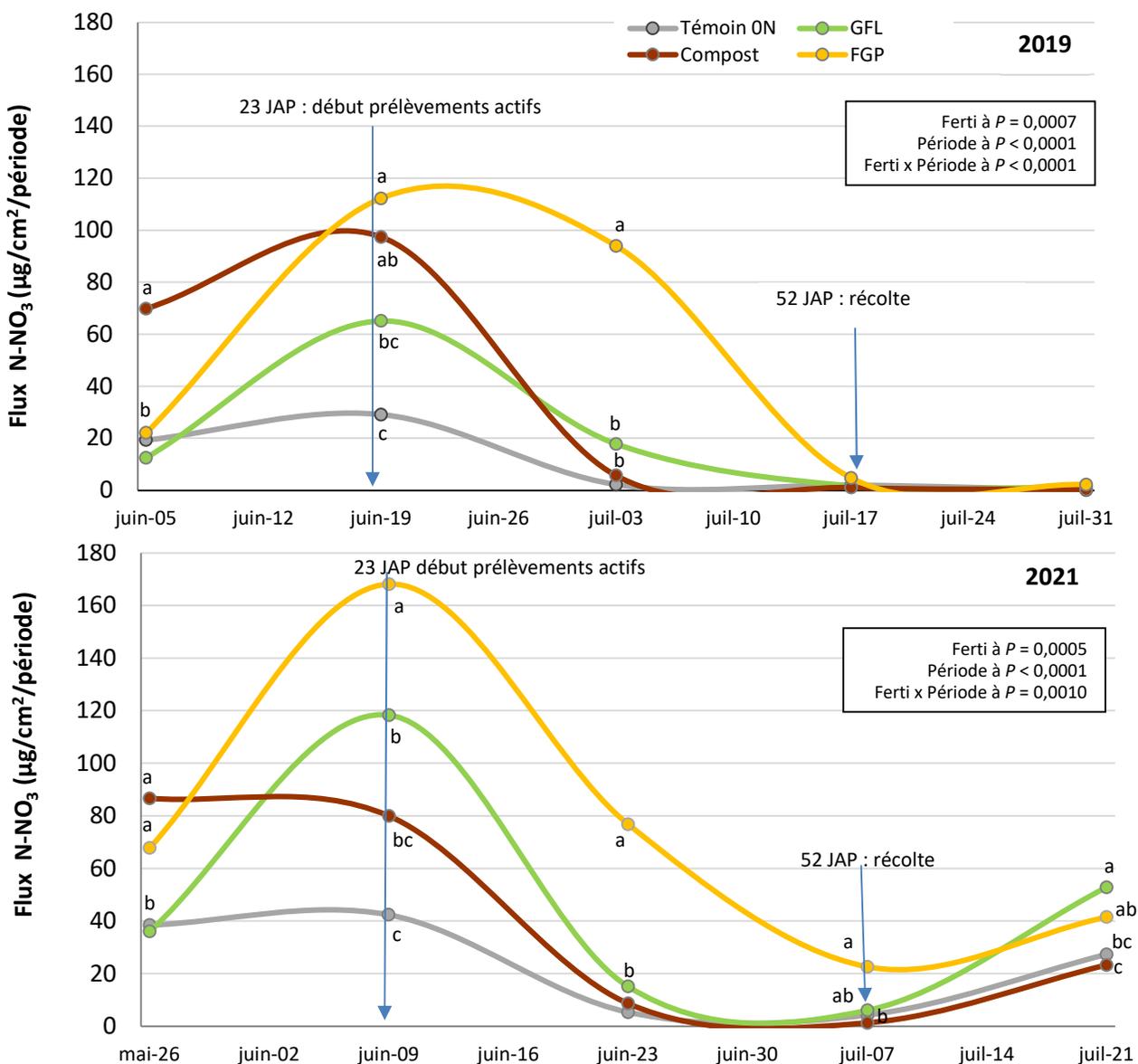


Figure 14. **Dynamique des flux de nitrate dans le sol de la butte (strate 0-20 cm) au cours des cinq périodes de suivi selon les traitements de fertilisation, en 2019 et 2021.** GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

Les mesures ponctuelles de N-NO₃ (extrait au KCl) vont dans le même sens que le suivi des flux du nitrate avec les MEI (Tableau 6). À 23 JAP, les sols fertilisés aux FGP présentaient les teneurs en nitrate les plus élevées, soit 4,5 à 5 fois plus que dans les sols témoins les deux années. Les sols avec GFL contenaient quant à eux environ 2 fois plus de nitrate que le sol témoin, mais la différence n'est significative qu'en 2019. Enfin les sols avec compost ne

présentaient pas de différence avec les sols témoins. À 37 JAP, les différences s'estompent et seuls les sols avec FGP, en 2019, contenaient plus de nitrate que tous les autres sols.

Tableau 6. Teneurs en nitrate du sol en fonction des traitements de fertilisation le 19 juin (23 JAP) et le 3 juillet (37 JAP), saison 2019.

Traitements	2019		2021	
	23 JAP	37 JAP	23 JAP	37 JAP
	----- kg N-NO ₃ ha ⁻¹ b.s. -----		----- kg N-NO ₃ ha ⁻¹ b.s. -----	
Témoin ON	15 c ³	6,2 b	36 b ³	9,2
Compost	26 bc	6,9 b	44 b	13,6
GFL	34 b	9,3 b	62 b	13,5
FGP	74 a	24,0 a	163 a	17,7
<i>Valeurs P</i>	<i>< 0,0001</i>	<i>0,0090</i>	<i>0,0008</i>	<i>0,1920</i>

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

3.4 ACTIVITÉ BIOLOGIQUE DU SOL

Il était attendu que l'apport de EO présentant un contenu plus élevé en C labile (FGP et GFL) produirait une hausse du contenu de ce dernier dans les sols et une activation de la respiration (Zhou et coll., 2021), contrairement au produit plus mature. Cependant, l'apport d'aucun des EO n'a modifié statistiquement le contenu en C labile (C_{eau}) du sol (Tableaux 7 et 8). Toutefois, les FGP et les GFL ont en partie modulé le taux d'activité biologique (dégagement de CO₂) et le potentiel de production de nitrate (Δ N-NO₃) (Tableaux 7 et 8). Dans le cas du compost, les résultats sont donc cohérents avec son très faible contenu en C labile et la forte stabilité de son carbone total (ISB de 45 %) (section 3.2). Ainsi, aucun des indicateurs mesurés ne présentaient de valeur différente du sol témoin. Dans le cas des FGP, le peu de différences notées pourrait être dû en partie à leur forte réactivité (instabilité), soit qu'une partie importante du C labile ait déjà été minéralisée, tel que le suggèrent les flux de N-NO₃ captés sur les MEI (Figure 14). En effet, seules les mesures à 23 JAP présentent des différences en comparaison du sol témoin, soit un potentiel de production de nitrate (Δ N-NO₃) 2,8 et 4,9 plus élevé en 2019 et 2021, respectivement. Inversement, à 23 JAP, les sols avec GFL ne présentaient aucun effet ou tendaient à produire une légère immobilisation (Δ N-NO₃ négatif) du nitrate en comparaison du témoin, mais étaient le seul EO à présenter un Δ N-NO₃ (2021) ou un taux respiratoire (2019) plus élevé (2,3 fois, $P = 0,0636$) que les sols témoins à 37 JAP. En 2021, les sols fertilisés aux GFL semblaient aussi démontrer un taux respiratoire plus élevé (1,6 x), mais la différence est non significative (Ferti : $P = 0,2797$).

Tableau 7. Valeurs de différents indicateurs d'activité microbiologique du sol en fonction des traitements de fertilisation le 19 juin (23 JAP) et le 3 juillet (37 JAP), saison 2019.

2019 Traitements	23 JAP		37 JAP		
	$\Delta N-NO_3^1$ kg ha ⁻¹ b.s.	C _{eau} mg kg ⁻¹ b.s.	$\Delta N-NO_3^1$ kg ha ⁻¹ b.s.	CO ₂ 0-10 ² jrs ² mg CO ₂ g ⁻¹	C _{eau} mg kg ⁻¹ b.s.
Témoin ON	1,63 b	69	2,4	0,13 b	64
Compost	1,96 b	71	2,5	0,21 ab	74
GFL	-0,63 b	74	3,6	0,30 a	78
FGP	7,98 a	73	4,0	0,20 ab	78
<i>Valeurs P</i>	0,0959	0,9236	0,1801	0,0905	0,2189

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

¹ Potentiel de minéralisation du N suivant une incubation 0-10 jours

² Respiration microbienne (CO₂) sur 10 jours

Tableau 8. Valeurs de différents indicateurs d'activité microbiologique du sol en fonction des traitements de fertilisation le 9 juin (23 JAP) et le 23 juin (37 JAP), saison 2021.

2021 Traitements	23 JAP		37 JAP		
	$\Delta N-NO_3^1$ kg ha ⁻¹ b.s.	C _{eau} mg kg ⁻¹ b.s.	$\Delta N-NO_3^1$ kg ha ⁻¹ b.s.	CO ₂ 0-10 ² jrs ² mg CO ₂ g ⁻¹	C _{eau} mg kg ⁻¹ b.s.
Témoin ON	9,5 b	86	4,3 bc	0,23	87
Compost	8,7 b	84	3,1 c	0,32	101
GFL	13,0 b	129	6,1 a	0,37	104
FGP	26,7 a	107	5,9 ab	0,29	103
<i>Valeurs P</i>	0,0189	0,2894	0,0263	0,2797	0,1475

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

¹ Potentiel de minéralisation du N suivant une incubation 0-10 jours. ² Respiration microbienne (CO₂) sur 10 jours

3.5 CONTENUS EN PHOSPHORE ET POTASSIUM DISPONIBLES DU SOL

Les analyses réalisées à 37 JAP révèlent que la fertilisation a influencé le contenu en P soluble du sol (P_{eau} : P-PO₄ en solution du sol) de la butte malgré un taux de saturation en P (P_{M3}/Al_{M3}) initial élevé de 15,8 % et 13,2 % en 2019 et 2021, respectivement (Figure 15). En 2019, la différence n'est pas significative (Ferti : P = 0,2700) même si les sols avec compost et FGP contiennent en moyenne 16 % plus de P soluble que les sols témoin et avec GFL. En revanche, en 2021, les sols avec compost et FGP contiennent le plus de P_{eau}, tandis que les sols avec GFL présentent des teneurs similaires à celles du sol non fertilisé. Ceci concorde avec les analyses de caractérisation physico-chimiques révélant que le compost et les FGP contiennent beaucoup plus de P_{total} T⁻¹ que les GFL, mais surtout un ratio N_{total}/P_{total} beaucoup faible (Tableau 5). Ainsi, puisque les apports de EO ont été faits sur la base des besoins en N (cible ≈ 170 kg N_{total} ha⁻¹), beaucoup plus de P a été appliqué avec le compost (moy. deux ans = 78 kg P ha⁻¹) et les FGP (moy. deux ans = 48 kg P ha⁻¹), qu'avec les GFL (moy. deux ans = 16 kg P ha⁻¹) (Tableau 4).

En ce qui a trait au potassium (K), la fertilisation semblait aussi avoir influencé le contenu en K soluble du sol (K_{eau}) (Figure 16). Cependant, les différences ne sont pas ressorties significatives malgré des contenus en apparence beaucoup plus élevés en K_{eau} (jusqu'à 40 %) pour les sols fertilisés avec les GFL, en comparaison surtout des sols témoins et de ceux fertilisés avec les FGP. D'une part, parce que le ratio N/K des GFL est plus près de 1 (GFL : N/K

= 1,3; FGP : N/K = 2,3) (Tableau 5), i.e. que plus de K est apporté par unité visée de N, même si par tonne les deux produits ont la même teneur en K_{total} . Cela dit, les GFL ont cependant une plus forte proportion de K soluble que les FGP (Tableau 5). À l'opposé, le compost, qui présente un ratio N/K de 1,2, similaire à celui des GFL, ne procure pas cet avantage les deux années et semble donc moins efficace que les GFL à hausser le K soluble, probablement en partie car son ratio K_{eau}/K_{total} est inférieur (Tableau 5).

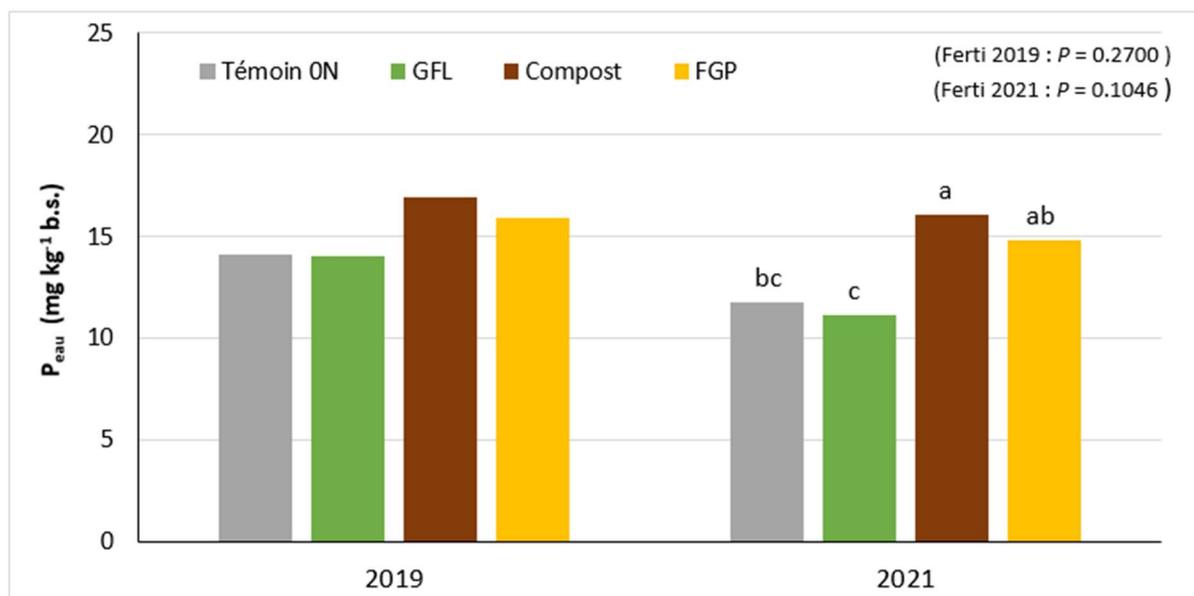


Figure 15. Contenu en P_{eau} du sol au stade 37 jours après plantation (2019 : 3 juillet et 2021 : 23 juin). GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

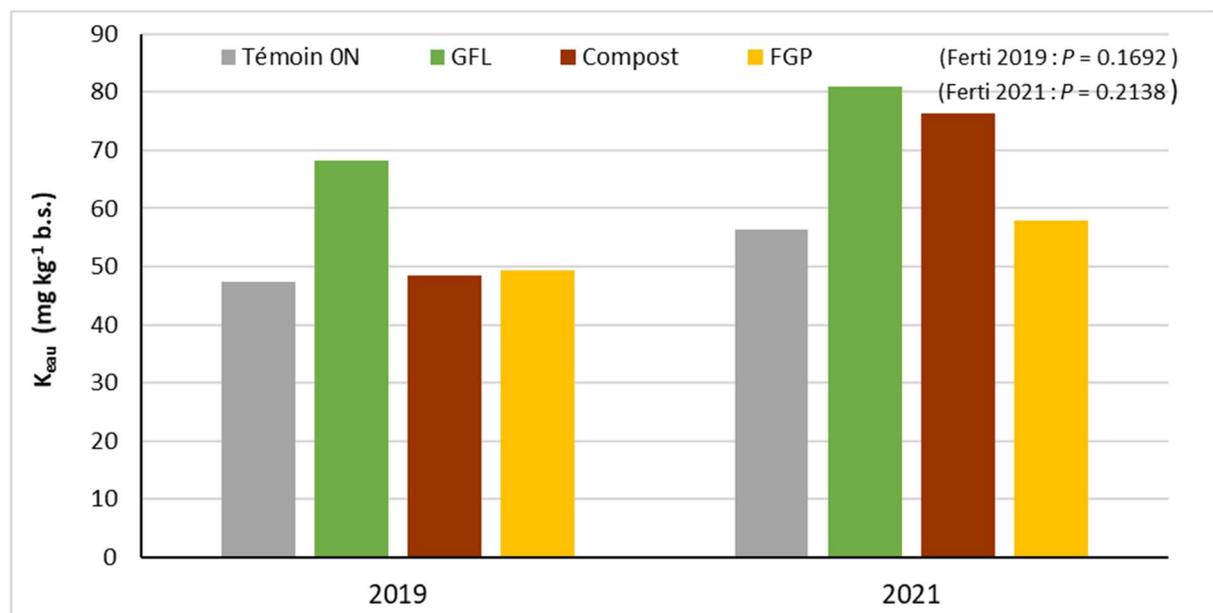


Figure 16. Contenu en $K_{soluble}$ du sol au stade 37 jours après plantation (2019 : 3 juillet et 2021 : 23 juin). GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

3.6 DÉVELOPPEMENT ET NUTRITION DE LA CULTURE

En accord avec la disponibilité en nitrate mesurée dans les sols, la fertilisation a eu un impact très significatif sur le développement des plants de brocoli les deux années et ce, dès le début de saison (Figure 17, Figure 18) et de plants individuels (Figure 18) prises à 37 JAP. Ainsi, les deux années, les plants fertilisés avec les FGP se sont démarqués rapidement et ont conservé une avance jusqu'à la récolte en comparaison des plants fertilisés aux GFL et au compost, de tailles similaires. En moyenne sur les deux années, il peut être dit que les plants de brocolis FGP étaient environ 30 % plus gros que ceux fertilisés aux GFL et compost, ces derniers étant à leur tour, en moyenne, 30 à 50 % plus gros, selon la date, que les plants témoins (Figure 17). Cette situation était en partie attendue puisque ces EO n'ont pas les mêmes coefficients d'efficacité (CE) du N. Pour une même dose de N_{total} , ils n'apportent donc pas la même quantité de $N_{efficace}$ (i.e. disponible aux plantes). Un des objectifs du projet était justement de comparer ces efficacités car si dans la littérature le CE des FGP est bien documenté (autour 90 % pour les cultures nitrophiles; Landry et coll. 2019), ceux pour les GFL et le compost le sont beaucoup moins. Les CE de ces derniers seraient similaires et relativement plus bas, soit autour de 30 % pour les GFL, et de près de 40 % pour le compost marin, basés sur leurs caractéristiques biochimiques mesurées dans cette étude (contenus en N_{total} , N_{min} et C/N; CRAAQ, 2003). Certains essais effectués sur le blé en serre comparant la performance de l'urée et des GFL rapportent aussi des CE se situant en moyenne à 32 % (Qian et coll., 2008). Ces différences de CE semblent concorder avec les différences de développement des plants. Les taux d'utilisation apparents du N (TUA) mesurés dans ce projet et discutés à la section 3.8 vont aussi dans le même sens (Tableau 13). Tel qu'il sera discuté à la section 3.7, ces gains de croissance se sont répercutés sur les rendements vendables produits (Figure 20).

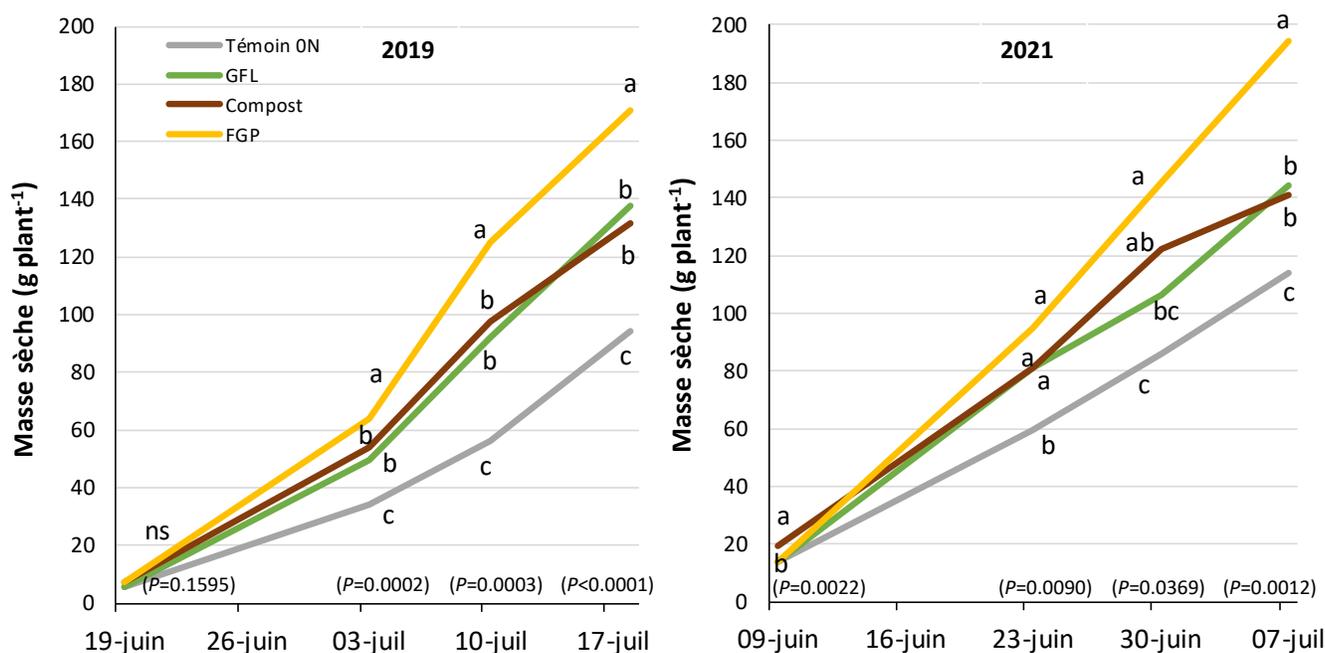


Figure 17. **Évolution de la biomasse aérienne des plants en cours des saisons 2019 et 2021, en fonction des traitements de fertilisation.** Entre parenthèse : la valeur de P de l'effet de la fertilisation pour chacune des dates. GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.



Figure 18. **Vu d'ensemble du développement des plants de brocolis 37 jours après plantation (haut : 3 juillet 2019; bas 23 juin 2021).** De gauche à droite : Témoïn 0N – granules de farine de luzerne (GFL) – Compost marin – fientes granulées de poules (FGP).

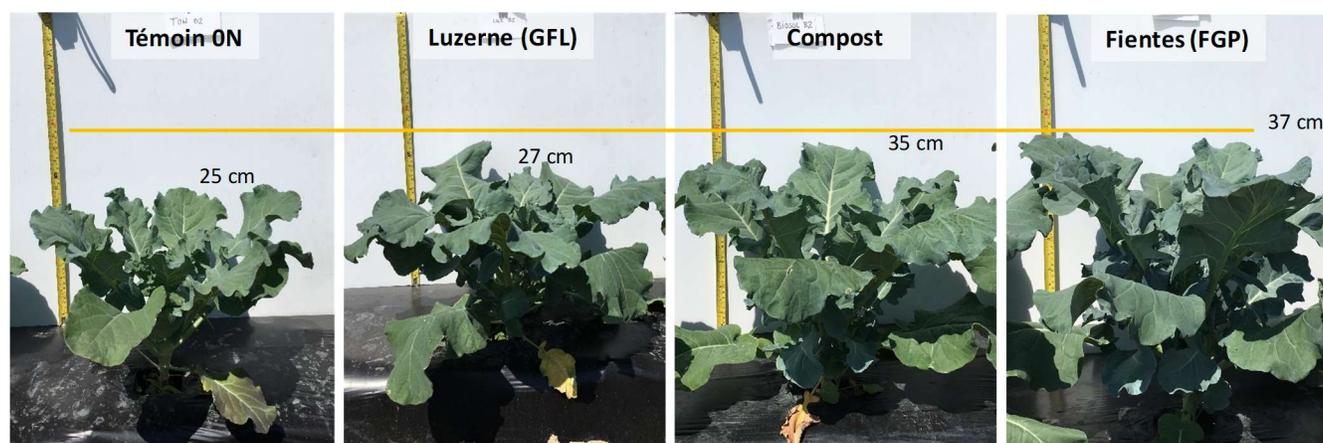


Figure 19. **Développement des plants de brocolis 37 jours après plantation, saison 2019.**

Puisque les prélèvements sont calculés en multipliant la masse sèche des plants par leurs teneurs en éléments, il est attendu que les plants avec une biomasse plus élevée prélèvent plus d'éléments. Ainsi, les prélèvements totaux (plant et/ou tête) (Tableau 9, Tableau 10) sont supérieurs pour les trois éléments (N, P et K) chez les plants

fertilisés aux FGP à toutes les dates, particulièrement pour l'azote (1,9 - 2,6 fois), mais aussi pour le phosphore (1,3-1,7 fois) et le potassium (1,2-1,6 fois), en comparaison des plants fertilisés aux GFL et compost. Cependant, les gains de biomasses (Figure 17), qui ne dépassent pas 1,3 fois, n'expliquent pas les écarts mesurés, surtout dans le cas de l'azote, pour lequel des apports similaires de 170 kg N_{total} ha⁻¹ étaient visés. De tels écarts sont également surprenants pour le P vu le taux élevé de saturation en P des sols ($P_{M3}/AL_{M3} = 15,8\%$ (2019) et 13,2 % (2021)) (Tableau 1) et le fait que la dose (3,5 t ha⁻¹) de FGP appliquée apportait près de deux fois moins de P_{total} que le compost (mais 3,6 fois plus que les GFL). De même pour le potassium, les apports de K étaient beaucoup plus faibles avec les FGP que ceux des GFL (1,4-2,1 fois moins) et du compost (1,6-1,8 fois moins). Les analyses foliaires apportent une explication (0). En effet, celles-ci (stade 8-10 feuilles) indiquent que les FGP ont produit les plus fortes teneurs foliaires en N les deux années et en P et K une année sur deux. En ce qui a trait aux prélèvements des plants fertilisés aux GFL et au compost, il n'y a globalement pas de différence significative entre eux, mais ceux-ci ont permis de meilleurs prélèvements, en comparaison des plants témoins. Ils ont aussi généré une teneur foliaire en N plus grande les deux années en comparaison du témoin, mais avec des effets moins consistants pour les éléments P et K. Le compost semble davantage améliorer la nutrition P, et les GFL la nutrition K, mais les effets ne sont pas présents les deux années. Par ailleurs, le statut foliaire des plants fertilisés aux GFL est le plus souvent statistiquement supérieur à celui des plants fertilisés au compost. Enfin, aucun gain supplémentaire notable n'a été retiré de la forte charge de P_{total} (7 et 3,5 fois plus) découlant de l'application de compost, en comparaison des GFL.

Au final, pour les plants présentant la meilleure croissance (FGP), les prélèvements totaux à la récolte sont les plus élevés en moyenne pour le potassium (126 et 132 kg K₂O ha⁻¹), suivi de près par l'azote (103 et 141 kg N_{total} ha⁻¹), les prélèvements en P étant très inférieurs (33 - 49 kg P₂O₅ ha⁻¹). Pour l'azote, ces valeurs se rapprochent des doses d'apports recommandées au Québec (130 - 190 kg N ha⁻¹) (CRAAQ, 2010). Dans le cas du potassium, les quantités prélevées sont également similaires à ce qui peut être recommandé comme apports maximaux (sol peu pourvu en K; CRAAQ, 2010). Par contre, les quantités de phosphore sont beaucoup plus faibles qu'attendues selon l'intervalle d'apports de la grille de référence en fertilisation du CRAAQ (2010). Suivant la récolte, en moyenne sur les deux saisons, l'exportation des têtes de brocoli des plants avec le meilleur développement (FGP) fait en sorte que 41 kg N ha⁻¹ quittent le site de production (Tableau 9 et Tableau 10).

Tableau 9. Prélèvements totaux en N-P₂O₅-K₂O en saison (10 juillet - 44 JAP) et à la récolte (18 juillet - 52 JAP-récolte) et exportations en N par la culture en fonction des traitements de fertilisation, saison 2019.

2019 Traitements	44 JAP			52 JAP			Export N kg ha ⁻¹
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
	kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹			
Témoin ON	23 c ¹	14 c	47 c	30 d	16 c	46 c	11 c
Compost	43 b	25 b	89 b	48 c	24 b	88 b	19 b
GFL	50 b	25 b	83 b	58 b	26 b	92 b	19 b
FGP	109 a	37 a	132 a	103 a	33 a	126 a	37 a
Valeurs P	< 0,0001	0,0007	0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

Tableau 10. Prélèvements totaux en N-P₂O₅-K₂O en saison (23 juin - 37 JAP; 30 juin - 44 JAP) et à la récolte (7 juillet - 52 JAP) et exportations en N par la culture en fonction des traitements de fertilisation, saison 2021.

2021 Traitements	37 JAP			44 JAP			52 JAP			Export N kg ha ⁻¹
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
	kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹			
Témoin ON	23 c	14 c	50 c	27 c	18 c	55 c	41 c	18 c	47 c	13 c
Compost	36 bc	21 b	74 b	49 bc	30 b	98 b	51 bc	25 b	67bc	17 bc
GFL	47 b	20 b	76 b	51 b	27 b	85 b	63 b	25 b	70 b	22 b
FGP	89 a	27 a	92 a	132 a	47 a	134 a	141 a	49 a	132 a	45 a
<i>Valeurs P</i>	0,0001	0,0100	0,0016	< 0,0001	0,0003	0,0002	< 0,0001	< 0,0001	0,0002	< 0,0001

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

Tableau 11. Statut nutritionnel du brocoli au stade 8-10 feuilles en fonction des traitements de fertilisation, 2019 et 2021.

Traitements	N (%)		P (%)		K (%)	
	2019	2021	2019	2021	2019	2021
Témoin ON	2,07 d ³	5,74 c	0,41 d	0,69 b	1,90 c	3,36 ab
Compost	2,66 c	6,59 b	0,46 c	0,74 a	1,95 c	3,42 ab
GFL	3,40 b	6,87 b	0,51 b	0,69 b	2,11 b	3,51 a
FGP	4,77 a	7,38 a	0,54 a	0,69 b	2,37 a	3,31 b
<i>Valeurs P</i>	< 0,0001	< 0,0001	0,0002	0,0083	0,0007	0,3393
VMC ¹		3,0		0,30		2,0
VME ²		5,6		0,50		4,0

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

¹VMC : valeur minimale critique, CRAAQ, 2010.

²VME : valeur maximale excès, CRAAQ, 2010

3.7 PRODUCTIVITÉ DE LA CULTURE

Les plants de brocolis, qui sont une culture nitrophile avec une croissance rapide, ont fortement profité de la hausse de disponibilité en azote (section 3.3), tant en termes de dynamique (rapidité et intensité de minéralisation; Figure 14) que de quantités (Tableau 6), fournie par les FGP. Les FGP ont ainsi donné les plus hauts rendements, trois fois plus élevés en moyenne sur les deux années que les rendements des plants témoins (Figure 20). Les GFL, qui sont un produit émergent pour lequel beaucoup moins d'information est disponible, ont aussi démontré une performance intéressante puisqu'ils ont procuré un gain de rendement significatif de 1,7 et 2,1 fois en 2019 et 2021, respectivement, par rapport aux plants témoins ON. Pour sa part, le compost n'a produit un meilleur rendement que le témoin uniquement qu'en 2021 (2019, effet n.s.). Ainsi, sur une moyenne de deux années, la fertilisation azotée a permis de produire 1,2, 2,0 et 4,6 t ha⁻¹ de têtes de brocoli de plus qu'en absence de fertilisation en utilisant, respectivement, le compost, les GFL et les FGP. La Figure 21 permet de visualiser les têtes récoltées pour une zone de rendement de 3,44 m (16 plants) selon les différentes fertilisations en 2021.

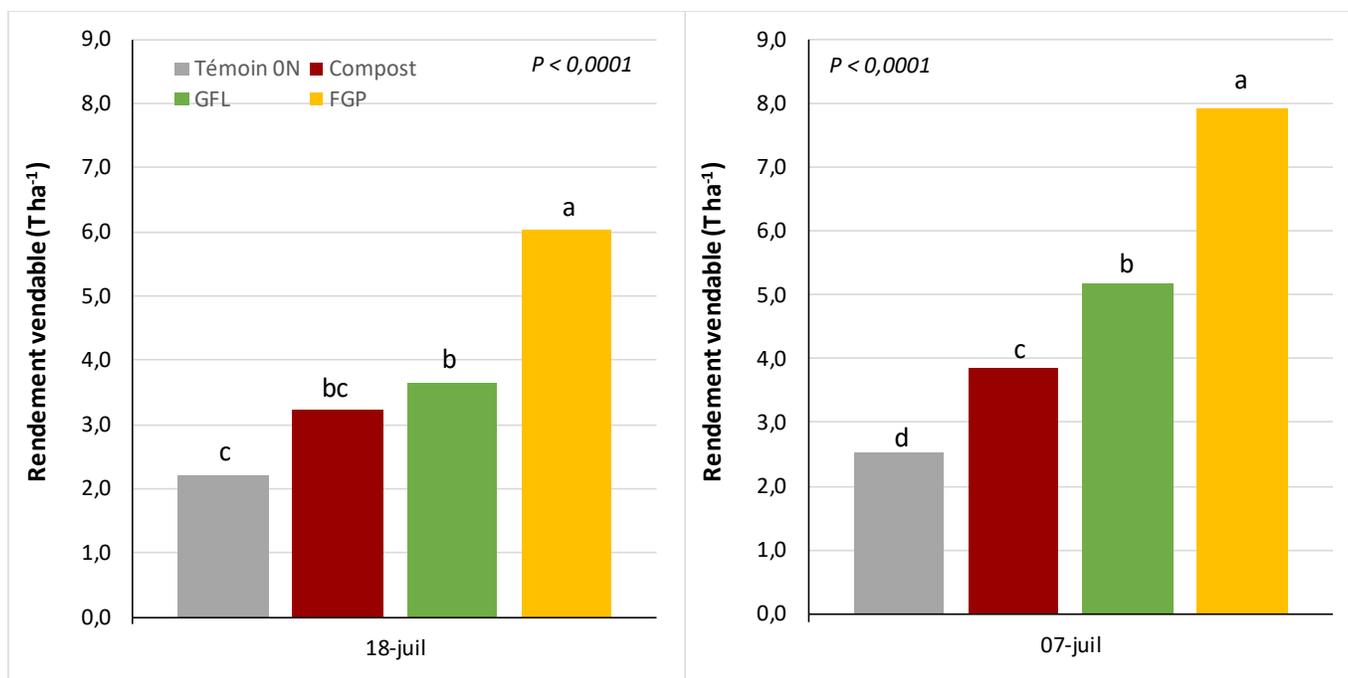


Figure 20. Rendement vendable en brocoli à la récolte en fonction des traitements de fertilisation, 2019 et 2021. GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.



Figure 21. Têtes de brocolis récoltées selon les différents traitements de fertilisation pour une zone de rendement (3,44 m; 16 plants), saison 2021.

Les calibres ont également été fortement influencés par la fertilisation et le résultat global est le même pour les deux années (Tableau 12). Ainsi, en moyenne sur les deux années, 15 % des têtes de brocolis ont présenté un diamètre < 6,35 cm en absence de fertilisation azotée (plants témoins), les autres têtes se classant toutes dans la catégorie suivante de 6,4 – 13 cm. L’apport de compost a principalement produit des têtes de la catégorie 6,4 – 13 cm (87 %), avec quelques têtes < 6,4 cm. Les GFL ont également produit une majorité de têtes entre 6,4 – 13 cm (82 %) et 18 % des têtes dans la catégorie suivante de > 13 cm. Les FGP produisent quant à eux la plus forte proportion de têtes de > 13 cm (72 %). Au final, ce sont les FGP qui présentent le calibre moyen le plus élevé les deux années. Les GFL et le compost se classent 2^e, *ex aequo* en 2019, mais le calibre est plus élevé pour les GFL en 2021. Enfin, le compost a tout de même permis un calibre moyen statistiquement plus élevé de 1,35 fois, en comparaison des plants témoins, les deux années. Ainsi, selon le calibre visé (gros ou intermédiaire), les GFL pourraient représenter un attrait puisque qu’ils produisent davantage de têtes de calibre intermédiaire en comparaison aux FGP, et aucune perte en comparaison au compost, lequel présente jusqu’à 10 % de perte en 2019 (moy. 7 %). Les figures 21 et la 22 permettent de visualiser les différents calibres selon la fertilisation.

Tableau 12. Classement des brocolis selon le diamètre de la tête, le pourcentage de pertes et le calibre moyen en fonction des traitements de fertilisation, 2019 et 2021.

Diamètre	2019				Calibre moy.	2021				Calibre moy.
	< 6,4 cm	6,4 à 13 cm	> 13 cm	Perte ²		< 6,4 cm	6,4 à 13 cm	> 13 cm	Perte	
Traitements	%				cm	%				cm
Témoin ON	19 a ¹	81 a	0 c	6	8,0 c	11 a	89 ab	0 c	6 a	8,3 d
Compost	3 b	78 a	19 b	10	11,5 b	2 b	96 a	3 c	3 ab	10,5 c
GFL	0 b	86 a	14 bc	0	11,6 b	0 b	78 b	22 b	0 b	11,9 b
FGP	0 b	41 b	59 a	0	14,1 a	0 b	16 c	84 a	0 b	14,6 a
Valeurs P	< 0,0001	0,0005	0,0002	0,2370	< 0,0001	0,0240	< 0,0001	< 0,0001	0,0439	< 0,0001

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

¹ Proportion de têtes vendables dans les catégories < 6 cm, 6,4 - 13 cm et > 13 cm.

² Pourcentage de pertes par rapport au rendement total.



Figure 22. Brocolis à maturité – exemple de calibres obtenus lors de la saison 2021 selon les différents traitements de fertilisation.

Enfin, les analyses du taux de sucre (degrés Brix) n'ont pas révélé de différence significative entre les traitements de fertilisation (données non présentées). En 2021, il semblait y avoir une tendance à un Brix plus élevé pour les brocolis fertilisés avec les FGP (6,30 °Brix) suivi de ceux des traitements GFL ou témoin ayant une valeur similaire de 5,60, suivi des brocolis fertilisés au compost présentant le plus faible degré Brix (5,45 °Brix), mais le seuil était non significatif à $P = 0,283$. Ainsi, les brocolis de tous les traitements avaient un degré Brix moyen de 6,3 et 5,7 en 2019 et 2021, respectivement.

3.8 BILAN D'UTILISATION DE L'AZOTE

Lors de la production en champ, l'azote prélevé par les cultures ne vient pas uniquement des apports d'engrais. Une partie provient toujours de l'azote du sol. Selon la fertilité des sites et l'efficacité des engrais, cette proportion sera plus ou moins importante. Cela dit, une contribution apparente, minimalement de 30 % du N prélevé, se retrouve assez fréquemment (N'Dayegamiye, 2008; Gasser, 2014; Landry et Boivin, 2014; Landry et coll., 2017; Landry et Boivin, 2012; Landry et coll., 2019). C'est le cas dans cette étude pour laquelle des contributions en N du sol entre 29 et 80 % ont été calculées ou, inversement, des contributions en N des EO entre 20 et 71 % (Tableau 13). Généralement, plus un engrais est efficace, moins la contribution du sol sera importante en proportion du prélèvement total. Ainsi, en moyenne sur les deux saisons, la contribution apparente du sol la plus importante a été calculée pour les plants fertilisés au compost (71 %), suivis de ceux fertilisés avec les GFL (59 %), puis de ceux fertilisés aux FGP dont la contribution se démarque fortement à la baisse (29 %).

Dans le cadre de cette étude, soit en sol sableux et sur buttes plastifiées, le taux d'utilisation apparent (TUA) moyen du compost est donc peu élevé (8 %) et celui des GFL intermédiaire (16 %), en comparaison des FGP qui présentent un TUA moyen de 51 %. Dans le cas des GFL, il s'agit de valeurs similaires à celles obtenues lors d'études menées dans le nord-est de la Saskatchewan. Celles-ci portaient sur les grandes cultures mais permettent une comparaison entre les GFL et le compost. Une première étude (2008 - 2010) testant des doses croissantes de GFL et de compost rapporte pour le blé et l'orge des TUA maximaux autour de 16 % et 5 % pour les GFL et le compost, respectivement (Malhi, 2012). Une seconde étude de 4 ans testant une dose unique de GFL ou de compost dans le canola (2009 - 2012) rapporte un TUA moyen de 14,7 % pour les GFL et d'au mieux 2,6 % pour le compost (Malhi et coll., 2013). Dans le cas des FGP, il s'agit d'un niveau de TUA déjà mesuré en grandes cultures nitrophiles (maïs-grain; Landry et coll., 2018 et 2019) et dans la fraise à jour neutre (comm. personn.). Ce niveau est élevé s'il est comparé à des TUA d'engrais minéraux qui servent habituellement de mesures étalons (choux 80 %, Guttormsen et Riley, 1996; légumes variés 28-62 %, Benincasa et coll., 2011; pomme de terre 72 %, Landry et Boivin, 2014; pomme de terre 48-77 %, Zebarth et coll., 2004; maïs-grain 61 %, Landry et coll., 2019). À ce propos, il est important de ne pas confondre taux d'utilisation (TUA) et coefficient d'efficacité (CE). Le TUA calcul la partie du N prélevé par la culture qui vient apparemment de l'engrais (N engrais vs N sol) tandis que le CE compare le TUA d'un produit organique à celui de l'engrais minéral dont le CE est toujours déclaré de 100 % (mesure étalon).

Pour les trois EO testés, l'application d'une dose visée plus près des besoins aurait probablement améliorer les TUA. En effet, la dose visée était de 170 kg N ha⁻¹, mais au final les prélèvements totaux les plus élevés se situaient à 141 kg N ha⁻¹ pour les plants fertilisés, dont une partie provenait du sol. Sur cet aspect, les GFL en 2019 et le compost en 2021, ont d'ailleurs été légèrement avantagés puisque moins de N_{total} que visé a été apporté. Malgré cela, leur TUA moyens des deux saisons demeurent bas en comparaison de celui des FGP. Le type de sol a aussi un impact. En effet, il est généralement admis que la minéralisation des EO est favorisée en sol sableux en comparaison des sols argileux, ce qui favorise de plus haut TUA. Dans le cas des GFL, qui sont un produit émergent, il se peut également que le manque d'information sur la meilleure régée à utiliser soit en cause. S'assurer d'une période de « démarrage » de quelques jours, avant la plantation des brocolis, permettant de bien humecter les granules et de favoriser leur attaque par la biomasse microbienne du sol, aurait peut-être aidé à la production des flux par minéralisation. Il se peut aussi que ce produit soit avantagé lorsque la culture présente un long cycle de croissance, ce qui n'est pas le cas du brocoli donc le cycle de croissance est particulièrement court, ce qui est avantageux pour les EO très labiles, tel les FGP. De la même façon, le compost aurait peut-être profité d'un cycle de production plus long ou d'une régée permettant son apport à l'automne précédent puisque les produits de plus forte stabilité (haut ISB) demandent de plus longues périodes pour produire de l'azote disponible par minéralisation.

Tableau 13. Bilan azoté et taux d'utilisation apparent (TUA) du N des engrais organiques (EO), 2019 et 2021.

Traitements	Apports par les EO (kg N _{total} ha ⁻¹)		Prélèvements totaux (kg N _{total} ha ⁻¹)		Contribution apparente des EO ¹ (kg ha ⁻¹) [%]		TUA (%)	
	2019	2021	2019	2021	2019	2021	2019	2021
Témoin ON	-	-	30 d ²	41 c ²	-	-	-	-
Compost	165	145	48 c	51 bc	18 [38 %]	10 [20 %]	11	7
GFL	143	174	58 b	63 b	28 [48 %]	22 [35 %]	20	12
FGP	175	170	103 a	141 a	73 [71 %]	100 [71 %]	42	59

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

¹ Calculée par différence. La contribution réelle demande l'utilisation de N¹⁵.

² Effet fertilisation à $P < 0.0001$.

Le potentiel résiduel de production de nitrate (Δ N-NO₃) des sols à la récolte (Tableau 14) appuie l'hypothèse que les GFL présentent un délai ou une vitesse moindre de libération du NO₃ suivant leur incorporation au sol. Cet aspect avait aussi été soulevé par l'analyse des flux de N-NO₃ qui remontaient le plus fortement pour les sols avec GFL en 2021 à la fin de la saison (Figure 14). Ainsi, la mesure sur 10 et 20 jours du nitrate produit en incubation de sol par chacun des EO démontre que le potentiel résiduel de fourniture en nitrate est le plus élevé avec les GFL. En 2019, les sols contenant des GFL ont produit 35 % plus de N-NO₃ en comparaison de la moyenne des autres sols fertilisés en 10 jours. En 2021, après 20 jours, la production de N-NO₃ des sols avec GFL était de 1,7 fois supérieure à celles des autres sols fertilisés. Et ceci, bien qu'en 2019, la quantité par hectare de GFL appliqués apportait moins de N_{total} ha⁻¹ que les autres EO (13 - 18 % moins) et qu'en 2021, la quantité de N_{total} ha⁻¹ était similaire à celle des FGP, puisque c'était le compost qui apportait le moins de N_{total} ha⁻¹ (15 % moins). À l'opposé, le sol avec compost est le seul EO dont la production de N-NO₃ est toujours égale et même inférieure à celle du

sol témoin. Au global, ces résultats d'incubation appuient l'hypothèse que les FGP réalisent rapidement leur potentiel de production de N-NO₃ par minéralisation du N organique, ce qui laisse moins de potentiel au bout de 52 JAP, au contraire des GFL qui présentent alors un potentiel plus élevé que les autres EO. En ce qui a trait au compost, celui-ci semble peu efficace à produire du N-NO₃ par minéralisation, ce qui concorde avec les flux mesurés *in situ* et sa composition biochimique (ISB, voir Tableau 5). Par contre, le compost présentait, avec les GFL, la meilleure disponibilité en K du sol, ce qui représenterait un avantage si la culture de brocoli était suivie d'une culture exigeante en cet élément. Dans un autre ordre d'idées, pour tous les EO, à chaque année, aucune production significative de N-NH₄ n'a été enregistrée (données non montrées).

Tableau 14. Potentiel de production de nitrate post récolte (52 JAP) en fonction de la fertilisation, 2019 et 2021.

Traitements	2019 ¹		2021 ¹		2019	2021
	Δ N-NO ₃ ²	Δ N-NO ₃	Δ N-NO ₃	Δ N-NO ₃	K _{soluble}	
	0-10 jours	0-10 jours	0-20 jour		mg kg ⁻¹	
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹		-----	
Témoin ON	2,9 ab	2,9 bc	5,8 b		52 bc	41 b
Compost	2,5 b	2,5 c	4,4 b		66 a	54 a
GFL	3,5 a	4,2 a	8,6 a		62 ab	59 a
FGP	2,7 b	3,5 ab	5,7 b		48 c	41 b
Valeurs P	0,0907	0,0068	0,0367		0,0786	0,0136

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

¹ Profondeur d'échantillonnage à la récolte: 2019 : 20 cm; 2021 : 30 cm.

² Incubation aérobie de 10 ou 20 jours (le 0-10 jours est poursuivi pour 10 jours supplémentaires en conservant le même temps 0 jours).

3.9 ANALYSE COÛTS-BÉNÉFICES

Les coûts variables de production et le calcul des bénéfices en fonction des calibres de brocolis (diamètre de la tête du brocoli) et de la fertilisation sont présentés aux tableaux 15 et 16, respectivement. Il ressort qu'il en coûte 1,7 et 4,0 fois plus cher avec le compost pour combler l'apport visé de N_{total} qu'avec les GFL et les FGP, respectivement. Bien que le compost possède des propriétés recherchées autres que l'apport en N (ex. source d'humus), du simple point de vue de la fertilisation en N, il s'avère donc dispendieux. À l'opposé, les FGP ont présenté le coût d'achat le moins élevé (Tableau 15) tout en favorisant nettement la proportion de brocolis de plus gros calibre (Tableau 16). De ce fait, la meilleure marge a été obtenue avec cet EO qui fournit 45 % de gains de plus que le traitement témoin sans engrais. À l'inverse, avec son coût d'achat important et des brocolis aux calibres inférieurs aux GFL et aux FGP, le compost a obtenu la moins bonne marge et cette dernière était même inférieure à celle du témoin de 5,4 %, bien qu'aucun frais d'EO n'ait été attribué au traitement témoin. Ainsi, les revenus attribuables au traitement avec compost n'ont pas été suffisants pour favoriser la marge de cet EO, en comparaison du témoin. Les GFL quant à eux ont permis une marge intéressante de 18 % supérieure au traitement témoin sans EO. Ainsi, au final, d'un point de vue économique, le compost n'apparaît pas comme un engrais avantageux pour combler les besoins exigeants en N des brocolis. Le faible coût par unité de surface des FGP, qui s'explique par leur contenu en N supérieur aux autres EO testés combiné à une efficacité fertilisante élevée du N, confère un net avantage économique à cet engrais. Les GFL quant à eux ont permis un gain au niveau des revenus, ce qui justifie leur utilisation comme source d'engrais N en comparaison du traitement témoin sans EO.

Tableau 15. Coûts variables de production de brocolis biologiques en fonction des types d'EO utilisés pour des apports équivalents de 170 kg N_{total} ha⁻¹ et pour une superficie de production de 1000 m².

Traitements	Coût EO (\$ t ⁻¹)	Contenu des EO en N total ¹ (kg t ⁻¹)	Coûts EO (\$ 1000 m ⁻²)	Autres Frais ² (\$ 1000 m ⁻²)	Frais totaux (\$ 1000 m ⁻²)
Témoin	0	0	0	1191,50	1191,50
Compost	511,20	11	790,04	1191,50	1981,54
GFL	435,00	25	295,80	1191,50	1487,30
FGP	450,00	48	159,38	1191,50	1350,88

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

¹ Référence Tableau 4

² Tiré de l'AGDEX 252.19/821 (2017)

Tableau 16. Marge sur coûts variables de production de brocolis biologiques en marché de proximité (kiosque directement à la ferme) en fonction des types d'EO utilisés et des calibres produits pour une superficie de 1000 m² (moyenne des deux années d'essai).

Traitements	Revenu en fonction du calibre ¹						Bénéfice total (\$)	% de perte	Marge (\$)	Gains par rapport au témoin (%)
	< 6,35 cm (%)	Revenu (\$)	6,35 à 13 cm (%)	Revenu (\$)	> 13 cm (%)	Revenu (\$)				
Témoin	15,0	757	85,0	6 383	0,0	0	7 140	7,1	5 445	0,0
Compost	2,5	126	86,5	6 488	11,	1121	7 736	7,8	5 151	-5,4
GFL	0,0	0	82,0	6 172	18,	1795	7 967	0,8	6 416	17,8
FGP	0,0	0	28,5	2 164	71,5	7138	9 303	0,8	7 877	44,7

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

¹ Revenu associé pour chaque proportion de calibre avec une densité de 2 506 plants/1000 m² (diamètre de la tête : < 6,4 cm = 2,00\$/plant; 6,4 à 13 cm = 3,00 \$/plant; > 13 cm = 4,00 \$/plant).

² Marge = Bénéfice total – Frais fixes totaux (réf. Tableau 15)

3.10 NITRATE RÉSIDUEL ET BILAN PHOSPHORE

Pour les cultures courtes, suivi d'un 2^e cycle de production, le nitrate et le phosphore résiduel sont un enjeu moins problématique que pour les récoltes de fin de saison. En effet, ceux-ci peuvent être considérés dans le calcul des apports de N et P à fournir à la culture subséquente ou être captés par des cultures pièges (cultures de couverture, engrais verts) implantées suivant la récolte. Dans cette étude, seuls les FGP et les GFL ont fait augmenter le nitrate post-récolte. En 2019, les FGP ont le plus grand impact avec deux fois plus de nitrate résiduel, en comparaison des autres EO (Tableau 17). Par contre, rappelons que les GFL ont été apportés en moindre quantité (143 vs. 175 kg N_{total} ha⁻¹). En 2021, les teneurs en nitrate résiduel sont les mêmes pour les FGP et les GFL. Ainsi, tel que suggéré aux sections précédentes, les GFL ont semblé bénéficier d'une présence plus longue dans les sols. Pour sa part, le compost n'a eu aucun effet significatif sur ce paramètre. Par contre, en ce qui a trait au phosphore, c'est le compost qui a le plus contribué à hausser le P_{eau} (Tableau 17). Cela s'explique par le bilan d'apport de P beaucoup

plus élevé pour le compost que pour les autres EO (Tableau 18). Les valeurs de bilan font bien ressortir l'impact d'utiliser un engrais avec un faible ratio N/P pour nourrir des cultures exigeantes en N. En ce sens, le bilan des GFL est intéressant car bien qu'ils comprennent deux fois moins de N_{total} que les FGP, puisque leur composition en P_{total} est 5 fois inférieure, leur bilan P est plus intéressant que celui des FGP. Le bilan des FGP est quant à lui amélioré par le fait que le N_{total} est élevé, ce qui compense le contenu intermédiaire en P de cet EO, en comparaison des deux autres. Rappelons que si le P_{eau} (Sissingh, 1971) est disponible aux cultures, il est également lié au risque de pertes de P dans l'environnement.

Tableau 17. N résiduel et teneur en P soluble du sol à la récolte (52 JAP) en fonction des traitements de fertilisation, 2019 et 2021.

Traitements	N-NO ₃ résiduel kg ha ⁻¹		P _{eau} mg kg ⁻¹	
	2019 ¹	2021 ¹	2019	2021
Témoin ON	5,8 b ¹	10,5 b	13,9 b	10,6 b
Compost	5,5 b	11,0 b	19,2 a	13,0 a
GFL	6,9 b	12,8 a	15,3 b	10,5 b
FGP	14,3 a	13,0 a	16,8 ab	10,1 b
Valeurs P	0,0058	0,0808	0,0623	0,1089

GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

¹ Profondeurs d'échantillonnage à la récolte: 2019 : 20 cm; 2021 : 30 cm.

Tableau 18. Bilan P (P₂O₅) à la récolte (52 JAP) en fonction des traitements de fertilisation, 2019 et 2021.

Quantité de P ₂ O ₅ ha ⁻¹	2019 kg ha ⁻¹			2021 kg ha ⁻¹		
	GFL	Compost	FGP	GFL	Compost	FGP
Apporté par l'EO	31	211	111	42	145	111
Prélèvement totaux	26	24	33	25	25	49
Exportations têtes	6	6	11	9	7	17
Bilan (kg P₂O₅ ha⁻¹)	+ 25	+ 205	+ 100	+ 33	+ 138	+ 94

EO : engrais organique; GFL : granules de farine de luzerne; Compost : compost marin; FGP : fientes granulées de poules.

4 CONCLUSION

Dans le cadre de ce projet, trois engrais organiques (EO) ont été comparés pour la fertilisation d'une culture biologique de brocolis sur buttes irriguées en sol sableux. Les EO ont été testés à doses égales d'apport d'azote (N) total (170 kg N_{total}/ha) afin de pouvoir comparer leur dynamique de relâchement (flux; quantité et intensité) de N minéral dans le sol, calculer leur taux d'utilisation apparent (TUA) azoté et les rendements produits (quantité et calibre). Les EO comparés étaient les fientes granulées de poules (FGP), les granules de farine de luzerne (GFL) et le compost marin. Selon leurs contenus totaux exprimés sous forme de N-P₂O₅-K₂O, la formulation des EO étaient de 4.8 - 3.1 - 2.5 pour les FGP, 2.5 - 0.6 - 2.4 pour les GFL et 1.1 - 1.2 - 1.1 pour le compost marin. Leurs caractéristiques biochimiques contrastées ont entraîné des dynamiques différentes en matière de fourniture en N, en phosphore (P) et en potassium (K) disponibles à la culture, lesquelles se sont répercutées sur les rendements. Ainsi, les FGP, riches en N_{total} et en carbone labile, de faible stabilité biologique et faible C/N, ont libéré avec intensité (rapidement et fortement) du nitrate. Ceci a permis aux plants fertilisés aux FGP de présenter le développement le plus rapide en saison et les rendements vendables les plus élevés en termes de quantité (6,1 t ha⁻¹) et de calibres (72 % calibre > 13 cm). Ainsi, ce produit, qui entraîne par ailleurs les frais les moins élevés, dégage la meilleure marge sur coûts variables (MCV, 44,7 %). Quant aux GFL, ceux-ci contenaient moins de N_{total}, mais possédaient un ratio N/P beaucoup plus élevé, plus proche du ratio du besoin des cultures. Leur contenu en C labile était le plus élevé et leur ISB aussi bas que celui des FGP, mais leur ratio C/N était de plus du double. En accord avec ces caractéristiques, les GFL ont produit des flux moins intenses que les FGP en saison, mais présentaient le potentiel résiduel port-récolte de fourniture en N le plus élevé. Diverses mesures suggèrent que leur minéralisation est moins rapide, d'une part à débiter, probablement à cause d'une phase transitoire d'immobilisation et, d'autre part, à soutenir des prélèvements élevés en saison. Les GFL ont tout de même permis de produire 64 % plus de rendement vendable (3,6 T ha⁻¹) que les plants témoins (ON), avec 80 % de calibre intermédiaire (6-13 cm) et 20 % de gros calibres (> 13 cm). Ainsi, malgré une efficacité moindre, avec des frais similaires aux FGP, ils dégagent une MCV intermédiaire positive de 17,8 %. En ce qui a trait au compost, celui-ci contient le moins de N, P et K. Il présente aussi les ratios N/P et N/K les plus bas et peu de formes solubles de ces éléments. Tel qu'attendu, il présente une stabilité élevée du carbone, indiquant un faible potentiel à minéraliser, mais possédant des caractéristiques structurantes bénéfiques pour les sols. Conséquemment, les flux de nitrate mesurés pour ce produit, les plus hauts suivant la 1^{ère} semaine d'application, s'abaissent par la suite et deviennent équivalents à ceux des sols témoins (ON) pour le reste de la saison. Les flux mesurés semblent donc principalement découler du relâchement des éléments déjà disponibles dans le produit au buttage. Des gains de rendement de 54 % sont toute de même obtenus, cependant, ceux-ci ne couvrent pas les frais de ce produit qui sont les plus élevés, donnant ainsi une MCV négative (- 5,4 %). Le compost entraîne aussi le bilan P le plus élevé (moy. deux saisons : 172 kg P₂O₅ ha⁻¹), tandis que les GFL sont près d'un bilan équilibré (moy. deux saisons : 29 kg P₂O₅ ha⁻¹). Par contre, tant les GFL que le compost présentaient tous les deux l'avantage d'une meilleure fertilité K en saison et surtout post-récolte.

Au final, le TUA du N le plus élevé a été calculé pour les FGP (moy. 2 ans : 51 %), suivi des GFL (TUA : 16 %), puis du compost (TUA : 9 %). Dans le cas des FGP, la valeur est très élevée, proche de celle mesurée pour des engrais minéraux. Dans le cas des GFL, qui sont un produit émergent, il se peut que le manque d'information sur la

meilleure régie à utiliser soit en cause. En effet, vu leur potentiel sur la base de leurs propriétés biochimiques, cette valeur pourrait peut-être s'améliorer si la régie assurait une période de « démarrage » de quelques jours, avant la plantation des brocolis, permettant de bien humecter les granules et de favoriser leur attaque par la biomasse microbienne du sol. Il se peut aussi que ce produit soit avantageé lorsque la culture présente un long cycle de croissance, ce qui n'est pas le cas du brocoli. Son cycle étant particulièrement court, les EO très labiles, tels les FGP, s'en trouvent avantageés. De la même façon, le compost aurait peut-être profité d'un cycle de production plus long ou d'une régie permettant son apport en automne précédent puisque les produits de plus forte stabilité (haut ISB) demandent de plus longues périodes pour produire de l'azote disponible par minéralisation. Enfin, des régies adaptées combinant deux (FGP et GFL) ou même les trois EO seraient à tester pour tenter de profiter des avantages de chacun. Par exemple, un apport combiné de 30 % FGP + 70 % GFL favoriserait des flux élevés de nitrate dès le buttage (FGP), avec un effet stimulant des FGP sur la minéralisation des GFL (meilleur ratio global C/N), ces derniers contribuant à une meilleure fourniture à plus long terme en N, en plus d'améliorer la nutrition K et le bilan P.

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.
- Agricorp.** 2021. Légumes destinés au marché frais – Normes de classement pour les pertes de superficie. [En ligne]. https://www.agricorp.com/fr-ca/Programs/ProductionInsurance/LeafyVegetables_AcreageLoss/Pages/Publications.aspx (consultée en 2021).
- Amrhein, V., Greenland, S., & McShane, B.** 2019. Scientists rise up against statistical significance. *Nature*, 567 (7748), 305-307.
- Benincasa, P., Guiducci, M., et Tei, F.** 2011. The Nitrogen Use Efficiency: Meaning and Sources of Variation—Case Studies on Three Vegetable Crops in Central Italy, *HortTechnology hortte*, 21(3), 266-273.
- 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. CRAAQ, Québec, 473 p.
- Fox, R.H. et Piekielek, W.P.** 1978. A rapid method for estimating the nitrogen supplying capability of a soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:743-747.
- Garcia, C., Hernandez, T. et Costa, F.** 1990. Study on water extract of sewage sludge compost. *Soil Sci. Plant Nutr.* 37(3):399-408.
- Gasser, M.-O., Perron, M.-H., Martel, S., Dufour-L'Arrivée, C. et Robert, L.** 2014. Maïs sur retour de prairie : réduire la fertilisation azotée et les émissions de gaz à effet de serre. Fiche synthèse, IRDA et Agrinova. 3 p.
- 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.
- Giroux, M., N'Dayegamiye, A. et Royer, R.** 2007. Effet des apports d'automne et de printemps de fumiers et de boues mixtes de papetières sur le rendement, la qualité de la pomme de terre et l'efficacité de l'azote. *Agrosolutions* 18(1) : 25-34.
- 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.
- Gavlak, R.G., Horneck, D.A. et Miller, R.O.** 1994. *Plant, Soil and Water Reference Methods for the Western Region.* WREP 125p.
- Guttormsen, G. et Riley, H.** 1996. Testing a Nitrogen Advisory Model for Vegetables. *Acta Hort.* 428, 205-214
- 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.
- Juma, N.G. et Paul, E.A.** 1984. Mineralizable soil nitrogen: Amounts and extractability ratios. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:76-80.
- Landry, C. et Boivin, C.** 2012. Performance des fertilisants à libération contrôlée et d'origine organique dans la fraise à jours neutres fertiguée. Rapport final PSIH10-1-355, 53 p.
- Landry, C. et Boivin, C.** 2014. Relations entre les nutriments minérale et hydrique: impacts sur la productivité de la pomme de terre et l'utilisation des engrais azotés. Rapport final CDAQ Projet # 6592. 53 p.

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 p.

Landry, C., Marchand-Roy, M., Mainguy, J. et Paradis, M. 2017. Développement d'une régie de culture misant sur l'amélioration de la santé des sols pour rétablir le potentiel de rendements de sites de fraisières en rangs nattés présentant un historique de dépérissement. Rapport final. IRDA. 36 p.

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. Projet Innov'Action no. IA115487. IRDA. 46 p.

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 p.

Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D., et Schabengerger, O. 2006. SAS. System for Mixed Models, second edition. Cary, NC: SAS Institute inc.

Malhi, S.S. 2012. Short-term residual effects of various amendments on organic C and N, and available nutrients in soil under organic crop production. *Agricultural Sciences*. 3(3), 10p.

Malhi, S.S., Vera, C. L. et Brandt, S.A. 2013. Relative effectiveness of organic and inorganic nutrient sources in improving yield, seed quality and nutrient uptake of canola. *Agricultural Sciences*. 4(12A), 18p.

N'Dayegamiye, A., Giroux, M., Gasser, M.O., Landry, C. et Guertin, S.P. 2008. Indicateurs efficaces pour prédire la fertilité azotée des sols, Fiche synthèse, IRDA.

OMAFRA. 2021. Exigences relatives à la densité pour le sirop d'érable de l'Ontario. [En ligne]. <https://www.ontario.ca/fr/page/exigences-relatives-la-densite-pour-le-sirop-derable-en-ontario>

Peters, J., Combs, S., Hoskins, B., Jarman, J., Kovar, J., Watson, M., Wolf, A., et Wolf, N. 2003. Recommended Methods of Manure Analysis. Univ. of Wisconsin Cooperative Extension Publishing, publication n° A3769. Madison, Wisconsin. 58 p.

Qian, P., Schoenau, J.J., King, T. et Fatteicher, C. 2008. Effect of soil amendment with alfalfa pellets and glycerol on nutrition and growth of wheat. Affiche scientifique. Soils and Crops Workshop.

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.

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.

Smith, R., Cahn, M. et Hartz, T.K. 2015. Survey of nitrogen uptake and applied irrigation water in broccoli, cauliflower and cabbage production in the Salinas Valley. FREP Final Report. [En ligne]. <https://www.cdfa.ca.gov> (consultée en 2019).

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.

Zebarth, B.J., Leclerc, Y. and Moreau, G. 2004. Rate and timing of nitrogen fertilization of Russet Burbank potato: Nitrogen use efficiency. *Canadian Journal of Plant Science*. 84: 845-854.