

RAPPORT FINAL – IA 219132

ADAPTATION DE LA RÉGIE DE PRODUCTION DE LA FRAISE À JOURS NEUTRES IRRIGUÉE PERMETTANT UNE MEILLEURE FONCTIONNALITÉ DES SOLS PAR L'ACTIVATION DES MICROORGANISMES BÉNÉFIQUES PAR AJOUT DE CARBONE LABILE À L'IMPLANTATION

DURÉE DU PROJET : 03-2021 / 03-2023



Auteur et responsable scientifique : Christine Landry, agr., biologiste PhD - IRDA

Co-auteurs : Julie Mainguy, Mylène Marchand-Roy, Aurélie Demers - IRDA

Collaborateurs : Marine Marel et Valérie Bernier-English – Ferme Onésime Pouliot

Rapport présenté à : Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, Cultivons l'avenir2, AAC-MAPAQ

Date : 15 septembre 2024

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., Mainguy, J., Marchand-Roy, M. et Demers, A. 2023. Adaptation de la régie de production de la fraise à jours neutres irriguée permettant une meilleure fonctionnalité des sols par l'activation des microorganismes bénéfiques par ajout de carbone labile à l'implantation. Rapport final IA 219132. IRDA et partenaires. 39 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., professionnelle de recherche, IRDA
- Mylène Marchand-Roy, M. Sc., professionnelle de recherche, IRDA
- Maude Langelier, M. Sc., professionnelle de recherche, IRDA
- Aurélie Demers, B. Sc., professionnelle de recherche, IRDA
- Marine Marel, M. Sc., chargée de projet R&D, Ferme Onésime Pouliot
- Valérie Bernier-English, M. Sc, responsable R&D, Ferme Onésime Pouliot
- Daniel Pouliot, propriétaire et producteur, Ferme Onésime Pouliot

ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

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

COLLABORATEURS

- Mélanie Gauthier, M. Sc., responsable en recherche et développement, AgroEnviroLab
- Stéphanie Tellier, M. Sc., agr., conseillère en horticulture et en agriculture biologique, MAPAQ-DRCN
- Carl Boivin et Jérémie Vallée – Équipe de régie de l'eau - IRDA

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.qc.ca

REMERCIEMENTS

Ce projet a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les auteurs remercient chaleureusement les producteurs de la Ferme Onésime Pouliot. Les remerciements s'adressent également au personnel du Laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA ainsi qu'aux auxiliaires de recherche de l'IRDA présents aux étés 2021 et 2022 qui ont permis de contribuer au franc succès du projet.



TABLE DES MATIÈRES

Description du projet	6
Mise en contexte.....	6
Objectifs	6
Matériel et méthodes	7
sites d'essais.....	7
Traitements	8
mise en place de l'expérience	9
Dispositif expérimental et analyses statistiques	10
Suivi hydrique du sol	10
Collecte des données	11
Méthodes d'analyses.....	13
Résultats et discussion	15
données agroclimatiques	15
Caractérisation de l'engrais organique et apport de C labile au sol	18
Développement et nutrition de la culture	20
Évaluation de la Santé globale du sol.....	25
renseignements économiques	30
1 Conclusion	33
Références	35
2 Annexes	36
Annexe 1 - Tableaux des apports de nutriments	36
Annexe 2 – Données climatiques	37
Annexe 3 – Dispositifs expérimentaux	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques des sols à l'implantation du dispositif.....	7
Tableau 2. Liste des traitements à l'essai pour les deux années d'étude.	9
Tableau 3. Dates des principales opérations culturales lors des deux années de l'essai.	12
Tableau 4. Caractérisation physico-chimique de l'engrais organique, 2021 et 2022.	19
Tableau 5. Apport de C labile selon les traitements de fertilisation, saisons 2021 et 2022.	19
Tableau 6. Rendements totaux commercialisables (fruits g /plant) en pourcentage relatif à la régie Producteur, selon les diverses régies de fertilisation et de fumigation en 2021 et 2022.	22
Tableau 7. Rendements commercialisables (fruits g plant ⁻¹) en saison en pourcentage relatif à la régie du producteur, selon les diverses régies de fertilisation et de fumigation en 2021 et 2022.	23
Tableau 8. Calibre moyen, périmètre du collet et proportion de plants atteints de verticilliose selon la fumigation et la fertilisation, saison 2021 et 2022.	24
Tableau 9. Statut nutritionnel des plants (folioles) selon la fumigation et la fertilisation, saisons 2021 et 2022.	25
Tableau 10. Cote de santé globale des sols des sites au printemps au moment de la mise en place de l'essai, saisons 2021 et 2022.	26
Tableau 11. Taux d'activité biologique du sol exprimé par respiration microbienne selon le stade de développement de la culture, la fertilisation et la fumigation, saisons 2021 et 2022.	27
Tableau 12. Contenu en azote labile et potentiel de production d'azote par minéralisation, selon le stade de développement de la culture, la fertilisation et la fumigation, saisons 2021 et 2022.	28
Tableau 13. Cote de santé du sol (AEL) selon les paramètres biologiques (CO ₂ Solvita, N labile Solvita, C actif) au stade cible nutrition, selon le type de fertilisation, toutes fumigations confondues, saisons 2021 et 2022.	29
Tableau 14. Contenu en nitrate résiduel post-récolte, selon la fertilisation et la fumigation, saisons 2021 et 2022.	30
Tableau 15. Coûts associés aux différentes régies de fertilisation et de fumigation, en comparaison du gain de rendement obtenu par rapport à la régie Producteur non fumigé pour les saisons 2021 et 2022.	31

Tableau 16. Variation de la marge sur coûts variables des diverses régies nutritives, en comparaison de la régie Producteur non fumigée, saisons 2021 et 2022.	32
---	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Parcelles d'essai au champ, 17 juin 2021.	9
Figure 2. Sondes TDR installées dans les buttes, à 5 cm et 15 cm de profondeur (image de gauche en 2021) et à 10 cm du goutte-à-goutte, sous le plant (image de droite en 2022).....	11
Figure 3. Échantillonnage des plants au stade reprise, le 16 juin 2022.	12
Figure 4. Moyennes des températures et pluviométrie, station météorologique de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans, saison 2021.	15
Figure 5. Moyennes des températures et pluviométrie, station météorologique de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans, saison 2022.	16
Figure 6. Suivi de la température du sol des strates 0-10 cm et 10-20 cm, saison 2021 et 2022.	17
Figure 7. Suivi de la teneur en eau volumique du sol mesuré par les TDR et précipitations (mm) à proximité, saison 2021.	17
Figure 8. Suivi de la teneur en eau volumique du sol mesuré par les TDR et précipitations (mm) à proximité, saison 2022.	17
Caractérisation physico-chimique de l'engrais organique.	18
Figure 9. Biomasses sèches des plants aux différents stades cibles de la production, selon l'apport ou non de fumigation, tout traitement de fertilisation confondu, saison 2021.	20
Figure 10. Biomasses sèches des plants aux différents stades cibles de la production, selon les différentes régies de fertilisation et de fumigation à l'étude, saison 2022.	21
Figure 11. Contenu en carbone actif (POXC) du sol au stade cible nutrition, selon le stade de développement de la culture, la fertilisation et la fumigation, saisons 2021 et 2022.	29

DESCRIPTION DU PROJET

MISE EN CONTEXTE

Le plan stratégique 2017-2020 de l'Association des producteurs de fraises et framboises du Québec (APFFQ, 2018) identifie comme priorités de recherche de 1) poursuivre les avancées technologiques, 2) diminuer la vulnérabilité associée aux coûts de la main-d'œuvre et 3) réduire l'impact environnemental de la production de la fraise à jours neutres (ex. production biologique). L'adaptation d'une régie sans apport de N soluble fertigué et misant sur la santé des sols s'inscrit dans cette lignée. Il est en effet désormais reconnu que la santé du sol, reposant sur la présence de microorganismes (MOG) bénéfiques fonctionnels, est liée à la productivité des sites (potentiel de fourniture en N du sol, rendements) et à la vigueur des cultures (résistance aux maladies et conditions climatiques adverses). Toutefois, pour être fonctionnels, les MOG doivent être présents et avoir accès au carbone (C) labile, seule source d'énergie, nécessitant des apports réguliers, car rapidement dégradé. La régie usuelle ne comporte toutefois aucun apport de C et inclut des traitements qui stérilisent les sols. Par ailleurs, tirer profit de la santé des sols requiert de pouvoir la déterminer. Actuellement, des laboratoires offrent une analyse globale de santé des sols, mais ceux-ci ont besoin de plus de données québécoises pour adapter les valeurs cibles des indicateurs. Ce projet propose donc d'adapter la régie actuelle en remplaçant en partie ou en totalité l'engrais azoté granulaire appliqué au buttage ou fertigué en saison par l'apport d'engrais organique contenant à la fois de l'azote organique (N_{org}), mais aussi du C organique labile. L'apport de C labile vise non seulement à stimuler la minéralisation du N_{org} en nitrate, mais aussi à créer des conditions de désinfection par asphyxie suivant une forte demande pour l'oxygène vis la stimulation de la vie microbienne bénéfique, ce qui permettrait peut-être de s'affranchir de la fumigation. L'apport de C labile pourrait aussi contribuer à rétablir plus rapidement l'activité des MOG bénéfiques dans les sols fumigés. Ultiment, la production sera moins dépendante des engrais azotés sujets au lessivage et plus résilients face aux stress biotiques et abiotiques, ce qui contribuera à stabiliser les revenus et à améliorer la rentabilité.

OBJECTIFS

L'objectif général est d'accroître la productivité du sol des buttes de fraisières à jours neutres en favorisant la fonctionnalité des populations microbiennes bénéfiques par l'apport de carbone organique (C) labile. Plus spécifiquement, il vise à 1) déterminer la proportion de C labile et d'engrais minéral à apporter et étudier l'impact de cette proportion et de la fumigation au printemps sur 2) l'activité biologique des sols et les indicateurs de santé globale du sol (physiques, biologiques et chimiques), 3) la vigueur des plants (biomasse, nutrition, maladies) et 4) les rendements en fruits. Enfin, faire une analyse des revenus et des coûts de l'ensemble des régies testées.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

SITES D'ESSAIS

Le projet s'est déroulé en contexte de production commerciale, à la Ferme Onésime Pouliot située à Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans, pendant deux saisons de croissance (2021 et 2022), dans des champs différents reconnus pour avoir une productivité faible à modérée et où les gains sur la santé des sols par la modification des pratiques de culturales avaient davantage le potentiel d'être observés. Les sites sélectionnés présentaient des sols de type loam argileux (2021) ou argile à loam argileux (2022) avec une proportion moyenne de +/- 30 % de gravier. Les propriétés physico-chimiques de la couche de surface (0-20 cm) des sols à l'étude sont présentées au Tableau 10.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques des sols à l'implantation du dispositif.

Paramètres	2021	2022
Physiques		
Stabilité des agrégats (%) (0,25 à 2 mm)	38	50
Proportion des agrégats (%) (0,25 à 2 mm)	59	74
Réserve en eau utile (%)	7,2	10,6
Densité apparente (0-20 cm) (g cm ⁻³)	1,12	1,08
Texture	Loam argileux	Argile à loam argileux
Biologiques		
Matière organique (%)	3,9	5,4
Respiration C-CO ₂ (ppm)	41	28
Azote labile N-NH ₃ (kg ha ⁻¹ b.s.)	69	134
Carbone actif (POXC) (ppm)	397	534
Carbone soluble (C _{eau}) (ppm)	158	123
Chimiques		
pH _{eau}	5,9	5,7
N-NO ₃ (kg ha ⁻¹ b.s.)	6,9	7,5
Éléments majeurs Mehlich-3 (kg ha ⁻¹ b.s.) :		
P	255	221
K	450	442
Ca	3716	3129
Mg	283	242
Al (mg kg ⁻¹)	1437	1489
P/Al (%)	7,9	6,6

TRAITEMENTS

Cinq régies nutritives combinant différentes proportions d'engrais minéral granulaire (EM) ou organique (org) (EO) au buttage, complétement d'engrais soluble (NPK ou PK seulement) fertilisé, étaient comparées. L'Acti-Sol 5-3-2, d'usage très répandu et offert sous forme granulée applicable par épandeur, a été sélectionné comme EO et source de C organique labile. L'engrais minéral granulaire au buttage était le mélange du producteur (14-8-9), à l'exception du traitement témoin ne recevant pas d'N. Pour ce traitement, un mélange composé de superphosphate triple (P) et de SulpoMag (K) a été réalisé manuellement. L'N soluble était apporté par un mélange de nitrate de calcium, nitrate de potassium et nitrate de magnésium. Ces cinq régies étaient testées avec (F) ou sans (NF) fumigation par la chloropicrine, totalisant ainsi 10 traitements.

Excepté pour le traitement témoin ON permettant de connaître la fourniture naturelle en N du sol, l'apport visé de N efficace (N_{eff}) était le même pour toutes les régies. La dose visée était de 90 kg N ha^{-1} (dose usuelle du producteur). En 2021, la dose épandue a effectivement été de 90 kg N ha^{-1} . Cependant, en 2022, une dose légèrement supérieure (95 - 103 unités) a été apportée en lien avec un changement de machinerie utilisée pour l'application des engrais. En effet, en 2021, juste avant la formation des buttes, les fertilisants (EM et EO) ont été appliqués au moyen d'un applicateur d'engrais en bande de marque APV PS300. Cet applicateur est efficace pour l'application d'engrais minéral granulaire ainsi que pour de petites doses d'Acti-Sol, mais sa capacité est insuffisante pour l'application de doses d'engrais supérieures à 500 kg ha^{-1} . Ainsi, pour les traitements avec une dose plus forte d'Acti-Sol ($\sim 70\%$ et 100% N_{org}), il a été nécessaire de faire plus d'un passage pour épandre la dose totale prévue. En 2022, afin d'éviter plusieurs passages de machinerie, un épandeur à fumier a été utilisé pour l'application de l'EO dans ces deux régies.

Un coefficient d'efficacité (CE) du N de 85% a été utilisé pour le N_{total} de l'Acti-Sol. En effet, bien que des essais en grandes cultures (avoine et maïs-grain) aient démontré des CE élevés du N_{total} de l'Acti-Sol ($80 - 110\%$; Landry et coll. 2019), le CE de cet engrais est inconnu lorsque celui-ci est incorporé dans une butte de sol. De plus, l'impact de la fumigation sur la performance de la minéralisation des engrais organiques est inconnu. Cependant, des essais en maraîchage biologique (brocoli) démontrent que des granules d'Acti-Sol incorporés dans des buttes fertilisées produisent des flux de nitrate rapidement et avec intensité dès les deux premières semaines (Landry et coll. 2023), justifiant de ne pas descendre sous un CE de 85% . Ce choix s'appuie aussi sur l'effet stimulant du C labile susceptible de contrebalancer en partie l'effet de la fumigation.

Les besoins phosphatés et potassiques non comblés par les engrais au buttage ont été complétés par fertigation. Les apports totaux en P_2O_5 , K_2O et en éléments mineurs étaient sensiblement les mêmes que ceux visés par les recommandations figurant au PAEF de l'entreprise et tendaient à être égaux pour tous les traitements, incluant le témoin ON. Toutefois, comme les sources de fertilisants différaient entre elles (engrais minéraux granulaires et solubles et engrais organiques) les cinq régies nutritives ont présenté de légères différences quant aux niveaux de P et K totaux reçus (2021 : 50 à $64 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ et 98 à $107 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$; 2022 : 56 à $89 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ et 49 à $71 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$). L'ensemble des traitements est résumé au Tableau 2 et les apports détaillés (type et quantité) sont consultables à l'Annexe 1.

Tableau 2. Liste des traitements à l'essai pour les deux années d'étude.

Traitements		Fumigation ²	Proportions exactes du type de N appliqué ³	
			2021	2022
T1	Témoin ON	NF	NA	NA
T2	Producteur		100 % EM	100 % EM
T3	~ 40 % org ¹		33 % EO et 66 % EM	39 % EO et 61 % EM
T4	~ 70 % org		66 % EO et 33 % EM	70 % EO et 30 % EM
T5	100 % org		100 % EO	100 % EO
T6	Témoin ON	F	NA	NA
T7	Producteur		100 % EM	100 % EM
T8	~ 40 % org		33 % EO et 66 % EM	39 % EO et 61 % EM
T9	~ 70 % org		66 % EO et 33 % EM	70 % EO et 30 % EM
T10	100 % org		100 % EO	100 % EO

¹ Proportion visée de N organique. ² Non fumigé : NF. Fumigé : F. ³ Quantités effectives après caractérisation physico-chimique de l'EO en laboratoire.

MISE EN PLACE DE L'EXPÉRIENCE

Les fertilisants organiques et minéraux ont été mis en place dès le début mai, les deux années, juste avant buttage. La fumigation a eu lieu lors de l'opération de buttage, de même que la pose des deux lignes de goutte-à-goutte et du paillis de plastique. Une semaine plus tard, les plants de fraisiers à racines nues (*var Seascope* à jour neutre) ont été transplantés en quinconce sur 2 rangs à 30 (2021) et 25 (2022) cm de distance (Figure 1). Les buttes étant espacées de 1,37 mètre centre-à-centre, la densité de plantation était de 47 000 plants ha⁻¹ en 2021 et 56 000 plants ha⁻¹ en 2022. Quelques jours après la plantation, les tensiomètres et les sondes TDR servant à la régulation des apports en eau ont été installés. Toute la saison, un suivi de culture (incidence des maladies et ravageurs) a été réalisé par inspections visuelles des plants. Les données climatiques de température de l'air (°C Max et °C Min) et de précipitations (station météorologique de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans (Latitude: 46.872021, Longitude: -70.992406) sont présentées à l'Annexe 2.



Figure 1. Parcelles d'essai au champ, 17 juin 2021.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET ANALYSES STATISTIQUES

Les traitements de fertilisations en parcelles principales ont été répétés quatre fois, selon un plan en tiroir, avec en sous-parcelles la fumigation, pour un total de 40 parcelles (Annexe 3 – Dispositifs expérimentaux). Chaque butte était fertilisée sur toute sa longueur avec la même régie nutritive. La parcelle principale était délimitée sur la butte, en retirant les premiers et derniers sept mètres linéaires (zones tampons). Aucune butte de garde n'a été mise 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 de champ, deux buttes de garde ont été préservées de part et d'autre du dispositif. Il est à noter que les buttes sur lesquelles passait le pulvérisateur n'ont pas servi à l'essai pour éviter l'effet de la compaction par les passages du pulvérisateur, l'imprécision des buses sous la rampe et le possible bris des plants par la machinerie (ces rangs ne sont pas illustrés sur les plans en annexe afin d'alléger la présentation du dispositif). En 2021, les parcelles mesuraient 38 m de long et comportaient 300 plants. En 2022, elles mesuraient 25 m de long et comportaient 200 plants.

Le dispositif est un plan en tiroir (split-plot), avec les traitements de fertilisation en parcelles principales et les traitements de fumigation en sous-parcelles. Une analyse de variance a été réalisée pour comparer les effets fixes et aléatoires des traitements en utilisant un modèle mixte normal ajusté avec la procédure PROC MIXED de SAS software. Les effets fixes sont les Régies de fertilisation, la fumigation et l'interaction Régie x Fumigation. Les effets aléatoires sont les blocs et l'interaction Bloc x Fertilisation. Pour certaines variables, les mesures ont été effectuées au cours de plusieurs dates, de sorte que les effets fixes des dates et des interactions Période x Fertilisation, Période x Fumigation et Période x Fertilisation x Fumigation, seront ajoutés au modèle. Lorsque l'effet d'un facteur ou d'une interaction est déclaré significatif par le test de F, les différences entre les moyennes seront explorées au moyen de tests de t. Dans le cadre de cette étude en milieu commercial, une différence au seuil de $P \leq 0.1000$ a été considérée comme significative étant donné l'impact potentiel pour le producteur.

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 d'un engrais organique. 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 à l'EO d'exprimer son 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 acquéreur de données CR300 (Campbell Scientific). Ces sondes permettent d'obtenir la teneur en eau volumique du sol, en utilisant le principe de réflectométrie dans le domaine temporel et estimer la permittivité diélectrique du sol (Deschênes, 2021). Elles permettent aussi d'obtenir une donnée de température du sol à la profondeur exacte de leur emplacement. Les deux années du projet, deux sondes TDR par butte ont été placées dans quatre traitements (T2, T7, T5 et T10), soit le traitement Producteur

et le traitement 100 % org, fumigé ou non. Les sondes ont été insérées à l'horizontale sous le plant dans une zone non perturbée, à 5 cm et 15 cm de profondeur, captant ainsi la température du sol en ces deux endroits. De plus, comme le rayon d'influence des TDR est de 5 cm, l'emplacement choisi pour leur insertion permettait d'obtenir l'humidité sur la strate 0-10 cm et sur la strate 10-20 cm du sol (0). Les sondes ont toutes été installées sur le côté est de la butte. Quatre sondes de température supplémentaires (modèle 109 de Campbell Scientific) ont été placées du côté opposé sur chacune des buttes, à l'Ouest, à une profondeur de 15 cm uniquement pour permettre d'obtenir une donnée plus uniforme de la température du sol sur la butte.

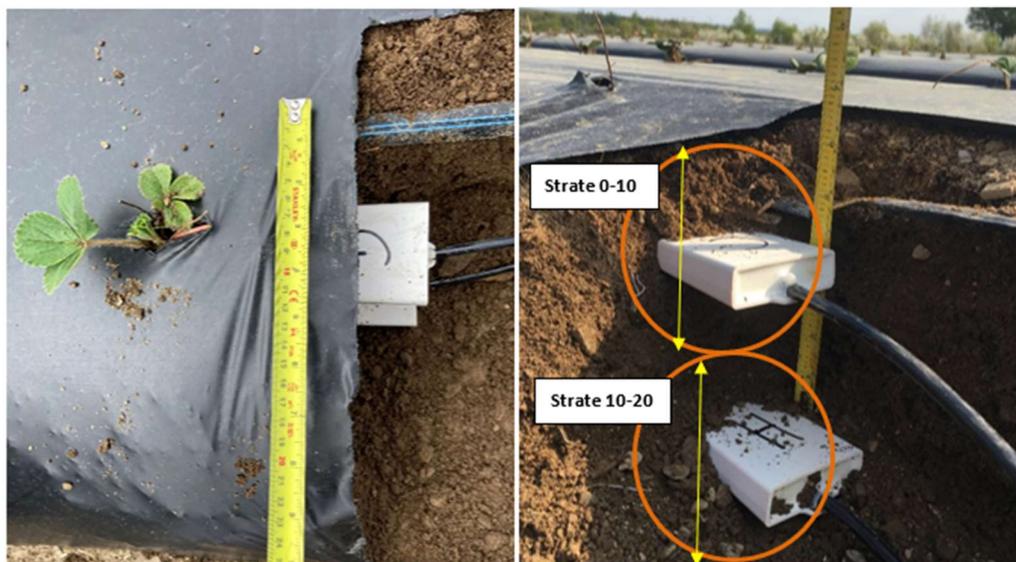


Figure 2. Sondes TDR installées dans les buttes, à 5 cm et 15 cm de profondeur (image de gauche en 2021) et à 10 cm du goutte-à-goutte, sous le plant (image de droite en 2022).

COLLECTE DES DONNÉES

Divers échantillonnages de sols, de végétaux et d'engrais ont été effectués au cours des deux années du projet. Les dates exactes de ces échantillonnages pour les deux années d'essais sont présentées dans le 0. Les stades cibles d'échantillonnages étaient au printemps, à la reprise des plants (3 semaines après la plantation), au stade nutrition (début à mi-juillet), au pic de production (mi-août) et en fin de saison (mi-octobre).

L'EO utilisé (Acti-sol) a été caractérisé au niveau physico-chimique le jour de l'application au champ à chacune des années du projet. De même, chaque printemps, avant l'implantation de l'essai, une caractérisation physico-chimique ainsi qu'une analyse de santé globale du sol ont été effectuées. Au stade cible de nutrition des fraisiers, des indicateurs biologiques de santé des sols ont à nouveau été dosés. Au stade pic de production, la stabilité des agrégats a été mesurée, mais uniquement dans les traitements Producteur (T2 et T7) et 100 % org (T5 et T10). Cependant, une mesure de la respiration microbienne et du N labile a été effectuée dans toutes les parcelles. Finalement, au stade fin de saison, le nitrate (N-NO₃) résiduel a été dosé. Les analyses de sol de printemps ont été réalisées sur des échantillons composites de 30 sous-échantillons par bloc, tandis que ceux en saison ont été réalisés sur des échantillons composites de 8 sous-échantillons par parcelle.

Toutefois, aux deux moments, la strate 0-20 cm été prélevée. À la récolte, l'échantillonnage de sol a aussi été fait par parcelle (8 sous-échantillons), mais sur la strate 0-30 cm pour quantifier le nitrate résiduel. La masse volumique apparente (MVA) a été déterminée à chacun des échantillonnages de sols afin de pouvoir convertir les ppm en charge (kg ha^{-1}), selon la strate de sol.

Tableau 3. Dates des principales opérations culturales lors des deux années de l'essai.

Opérations	Date	
	2021	2022
Piquetage, caractérisation du sol et masse volumique apparente (MVA)	28-avr	06-mai
Application des engrais	03-mai	10-mai
Buttage et fumigation	04-mai	10-mai
Plantation des fraisiers	13-mai	17-mai
Installation des sondes TDR	19-mai	02-juin
Stade reprise: prélèvement de plants	17-juin	16-juin
Stade nutrition: prélèvement de plants, de folioles, des sols et de MVA	09-juil	18-juil
Stade pic de production: prélèvement de plants, de folioles et de sols	18-août	19-août
Fin des récoltes	28-sept	25-sept
Stade fin saison : échantillonnage des sols, de MVA et retrait des sondes TDR	15-oct	13-oct

La biomasse aérienne a été déterminée sur 10 plants (2021) et 8 plants (2022) par parcelle au stade reprise et 6 plants par parcelle au stade cible nutrition et au stade pic de production. Plus de plants étaient prélevés au stade reprise pour tenter de diminuer l'hétérogénéité des plants qui était plus grande à ce stade précoce de développement. Les plants ont été coupés à la jonction racine-cœur (0). Le statut nutritionnel des plants a été mesuré au stade cible nutrition sur 20 folioles (plus jeunes feuilles matures sans pétiole) par parcelle. Les rendements fructifères et le calibre des fruits ont été comptabilisés à chaque récolte par l'équipe de recherche de la ferme (du 29 juin au 28 septembre en 2021 et du 7 juillet au 25 septembre en 2022). La qualité des fruits (indice de Brix et fermeté) a quant à elle été évaluée à quatre reprises en 2021 et à trois reprises en 2022 en laboratoire.



Figure 3. Échantillonnage des plants au stade reprise, le 16 juin 2022.

Méthodes d'analyses

Engrais organique

La caractérisation physico-chimique l'EO a été effectuée en majorité chez AEL. Les deux années, le pH_{eau} a été mesuré avec une électrode. Le taux de matières sèches a été calculé à la suite d'un séchage à 105°C, alors que le taux de matière organique a été calculé par incinération. La teneur en N_{tot} est issue d'une minéralisation acide. Les ions $N-NH_4$ et $N-NO_3$ ont quant à eux été extraits au KCl. Pour ce qui est des autres éléments nutritifs (P, K, Ca, Mg, Cu, Mn, Zn, Fe, Na et Al), ils ont été dosés par minéralisation acide. Par ailleurs, le laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA a établi l'indice de stabilité biologique (ISB) de l'EO selon la méthode décrite dans Landry et coll. (2011), soit la méthode originale AFNOR (XP U44-162) adaptée par L.E. Parent (2005), utilisant un digesteur de fibre (ANKOM 200) de la compagnie ANKOM Technology. Le carbone labile a été évalué par le C organique soluble à l'eau (C_{eau}) (Garcia et coll., 1990). Le carbone actif (POXC) n'a pu être évalué, car la méthode est trop agressive pour le produit. Le P soluble à l'eau (P_{eau}) a quant à lui été déterminé sur filtrat obtenu par centrifugation analysé par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon) (CPVQ, 1993).

Sol

Suivant leur échantillonnage, les sols ont été placés dans une glacière et conservés à 4 °C jusqu'à leur envoi aux laboratoires AEL ou IRDA.

AEL. La stabilité des agrégats a été évaluée au moyen d'un simulateur de pluie faisant tomber des gouttes sur un tamis contenant un poids connu d'agrégats d'un sol afin de déterminer le pourcentage d'agrégats entre 0,25 mm et 2 mm qui restent intacts, lorsque soumis à cette forte pluie. La proportion des agrégats a été déterminée en séparant les grains de sable grossiers et les débris organiques afin d'obtenir le poids des agrégats (0,25 mm à 2,0 mm) d'un sol. Le pH d'une suspension d'une partie d'eau pour une partie de sol (10 cm³ de sol/10 ml d'eau) a été mesuré par une sonde à électrode de verre. Les éléments nutritifs (P, K, Ca, Mg, Al, Mn, Cu, Zn, B et Fe) ont été extraits par la méthode Mehlich III et dosés par spectrophotométrie d'émission au plasma. La MO a été mesurée par perte au feu (incinération au four à moufle pendant un minimum de 12 heures). La respiration du sol repose sur l'activité microbienne mesurée lors d'une incubation de 24 hrs de sol séché réhumidifié par le relâchement de CO₂ absorbé sur gel coloré selon la technologie SOLVITA®. Le N labile est mesuré également pendant une incubation 24 hrs distincte de celle du CO₂, par extraction de l'azote ammoniacal $N-NH_3$ à l'aide d'une solution basique avec fixation sur gel coloré de la technologie SOLVITA®. Le C actif (POXC) a été extrait en utilisant 20 ml de permanganate de potassium 0,02 M ($KMnO_4$) réagissant avec 2,5 g de sol séché, puis dosé au spectrophotomètre portatif à 550 nm. La courbe d'étalonnage pour convertir l'absorbance en ppm utilise l'équation de Weil et al. (2003).

IRDA. Les contenus en C et N totaux ont été mesurés par combustion au LECO. Le pouvoir de minéralisation a été déterminé par la mise en incubation à température ambiante du sol humide pendant 10 jours. Les ions N-NO₃ et N-NH₄ ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminés par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon) au temps zéro et après dix jours. La respiration a été évaluée lors de la même incubation par la mesure du dégagement de CO₂ au cours de laquelle une éprouvette contenant 10 ml d'une solution de NaOH 1N capte le CO₂ sous forme de Na₂CO₃. La consommation de NaOH est ensuite déterminée par titration acidimétrique à l'aide une solution de HCl 1N permettant ainsi de déterminer la quantité de CO₂ dégagée par les microorganismes. Le C organique soluble (C_{eau}) a été déterminé par la méthode de Garcia et coll. (1991) utilisant 2 g de sol humide dans 10 ml d'eau, agités pendant 2 heures. La suspension est par la suite centrifugée à 5000 g et le C organique soluble mesuré après extraction au HCl.

Végétaux

Les plants ont été séchés à l'IRDA au minimum 48 heures à 105°C, puis pesés pour obtenir la biomasse sèche. Les folioles ont quant à eux été séchées 48 heures à 65°C pour doser les divers éléments nutritifs (P, K, Mg, Ca, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, B et S) ensuite extraits par digestion acide et dosés par ICP optique. Le N a aussi été extrait par digestion acide, mais le dosage a été effectué par colorimétrie automatisée.

Analyse coût-bénéfice

Les coûts à l'hectare des intrants pour les différentes régies de fertilisation en contexte fumigé et non fumigé ont été établis et comparés en regard des rendements relatifs obtenus avec la régie Producteur non fumigée. Les frais fixes applicables à toutes les régies ne sont pas présentés. Les coûts d'opération pour la fumigation proviennent de l'AGDEX 232/891 a. Puisque l'opération de fumigation ne requiert pas plus de main-d'œuvre que lors de l'opération de plasticulture, aucun frais de main-d'œuvre pour la fumigation ne figurait dans l'AGDEX. La marge sur coûts variables (MCV) pour les diverses régies nutritives testées a été calculée en comparaison à la régie Producteur non fumigée (données non montrées par souci de confidentialité). Les revenus ont été calculés en multipliant le rendement commercialisable obtenu par le prix moyen pondéré (\$/kg) d'un kg de fraise (AGDEX 232/821b). Les coûts variables (approvisionnement, opérations culturales, mise en marché, autres coûts) ont été considérés égaux entre toutes les régies. Les coûts d'opération d'épandage d'engrais proviennent de l'AGDEX 232/891, Cependant, les frais liés aux passages supplémentaires pour l'épandage de l'Acti-Sol (3\$/ha/passage) ont été jugés négligeables par rapport aux revenus totaux. Seuls les coûts liés aux fertilisants (\$/ha) propres à chaque régie ont été soustraits.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

DONNÉES AGROCLIMATIQUES

Les données météorologiques de températures de l'air et de pluviométrie de la station météorologique de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans indiquent que la saison 2022 a été plus fraîche et pluvieuse que la saison 2021 (Figures 4 et 5). Ainsi, en 2021, les températures se sont haussées rapidement, pour atteindre jusqu'à 30,6°C dès le 20 mai et se maintenir par la suite en plateau jusqu'à la fin août avec plusieurs pics au-dessus de 30°C (10 jours avec $T^{\circ}_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$). En comparaison, en 2022, exception faite du 13 mai, les températures ont augmenté graduellement pour atteindre un premier pic à 30°C uniquement le 18 juillet, se poursuivant ensuite pour un court plateau (3 jours avec $T^{\circ}_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$), avant de redescendre rapidement à la mi-septembre. De même, entre le 15 mai et le 31 août 2022, il y a eu 49 journées avec une T°_{\min} sous 15°C, contre seulement 39 journées en 2021 pour la même période. En ce qui a trait aux précipitations, la saison 2021 a été marquée globalement par peu de pluies, regroupées lors d'événements sévères, tandis que les précipitations de 2022 ont été de faible intensité et fréquentes (jours de pluie > 1 mm entre le 1 mai et le 15 sept : 2021 = 31, 2022 : 48).

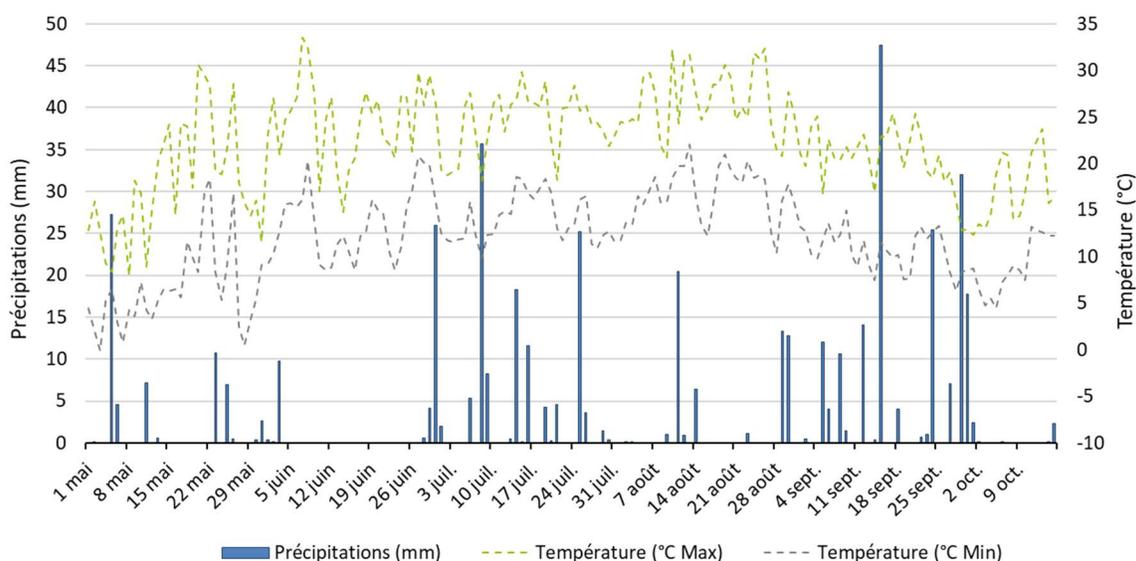


Figure 4. Moyennes des températures et pluviométrie, station météorologique de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans, saison 2021.

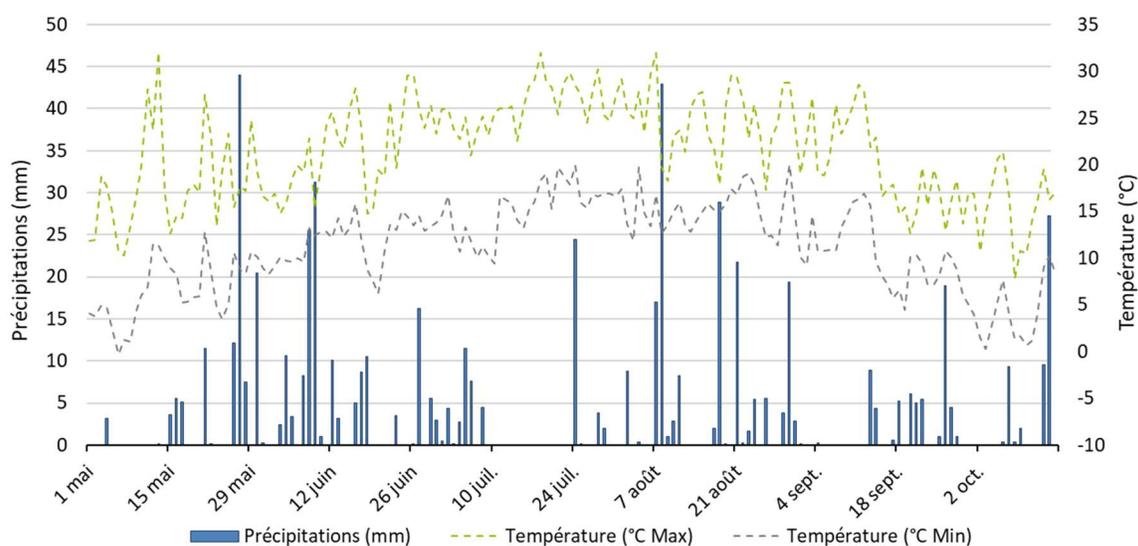


Figure 5. Moyennes des températures et pluviométrie, station météorologique de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans, saison 2022.

Conséquemment, le suivi des températures du sol pour les deux années (Figure 6) révèle que le sol de la strate 0-10 cm des buttes de 2021 a été plus chaud, plus rapidement, que celui des buttes de 2022. De plus, les deux saisons, les températures y sont très variables, avec des écarts jusqu'à 18°C dans une même journée. Dans la strate 10-20 cm où se situe majoritairement l'engrais organique, les températures sont plus stables et similaires pour les deux saisons. La température reste tout de même un peu plus élevée en 2021, avec une température moyenne journalière de 20°C (13,2 - 27,6°C) et 21°C (9,9 - 24,4°C) en 2021 et 2022, respectivement. En ce qui a trait aux valeurs de teneur en eau volumique du sol (Figures 7 et 8), une humidité beaucoup plus faible a été enregistrée dans la strate 0-10 cm en 2021 (moy. 0,13 cm³ eau/cm³ sol), en comparaison de 2022 (moy. 0,20 cm³ eau/cm³ sol), probablement à cause de la plus grande chaleur et des précipitations moins abondantes (somme cumulative de 458 mm de pluie), en comparaison de 2022 (somme cumulative de 557 mm de pluie), et cela malgré l'irrigation. En fait, l'eau semble principalement descendue dans la strate 10-20 cm en 2021 faisant en sorte que bien que la courbe de teneur en eau y soit plus variable, elle présente une teneur moyenne similaire à celle de 2022. Ainsi, au global, les deux saisons les conditions de température et d'humidité ont été similaires et favorables à l'activité des microorganismes dans la strate 10-20 cm où le ruban l'engrais se situe majoritairement suite au buttage.

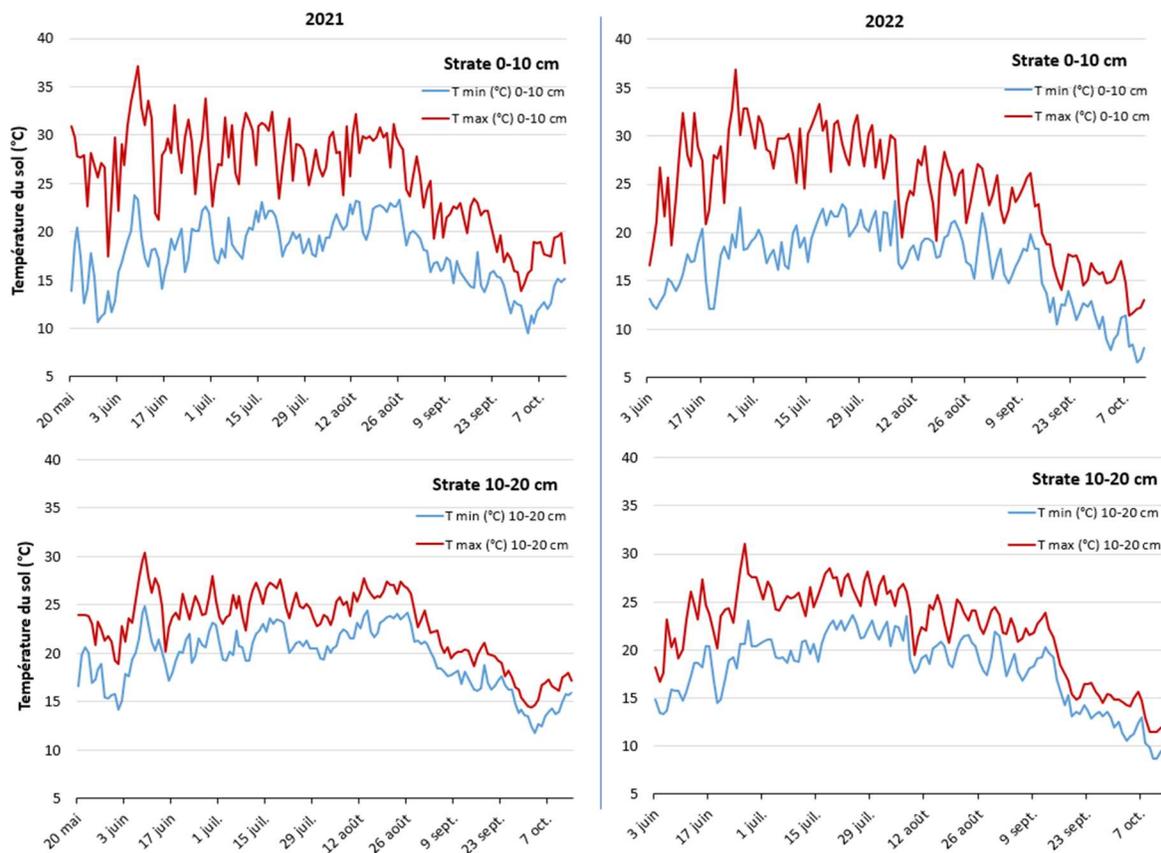


Figure 6. Suivi de la température du sol des strates 0-10 cm et 10-20 cm, saison 2021 et 2022.

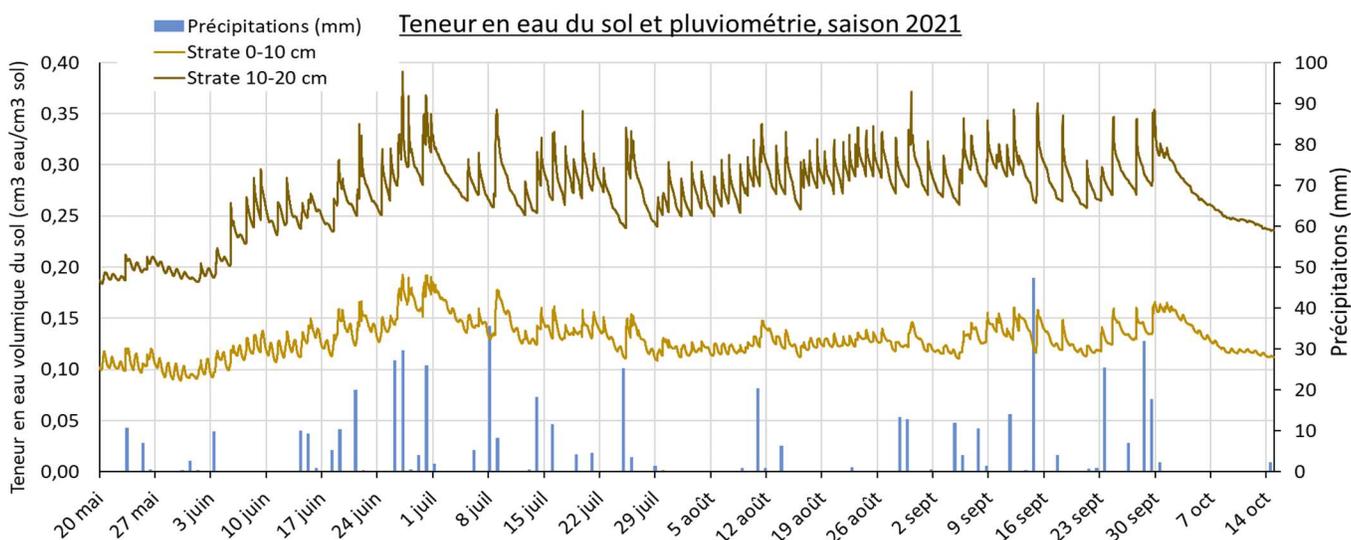


Figure 7. Suivi de la teneur en eau volumique du sol mesuré par les TDR et précipitations (mm) à proximité, saison 2021.

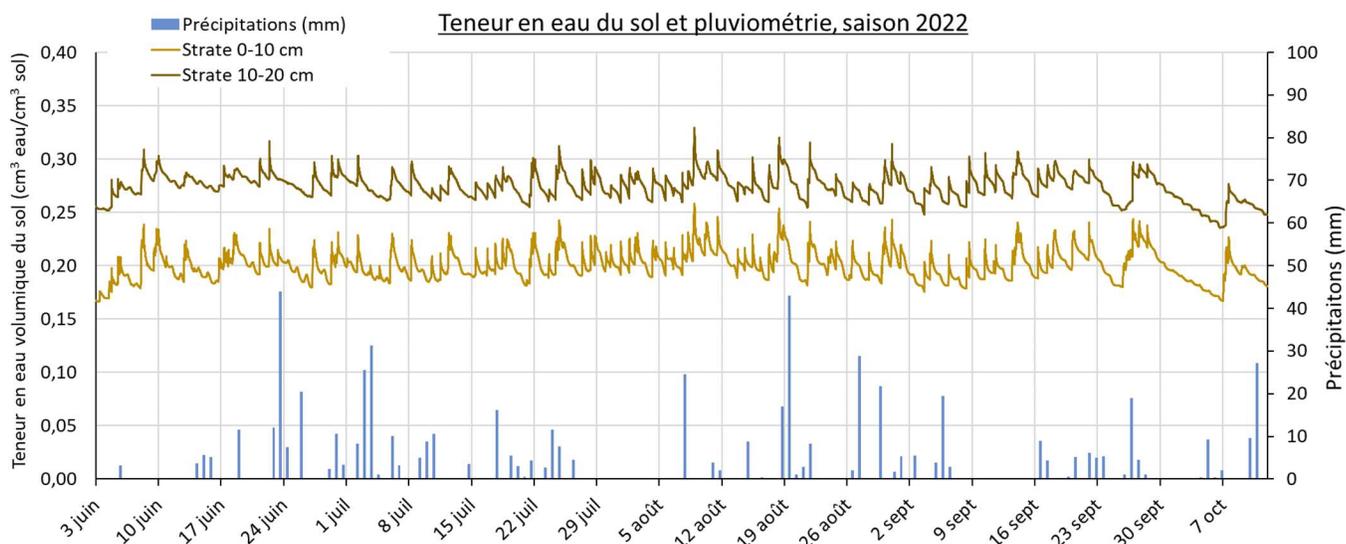


Figure 8. Suivi de la teneur en eau volumique du sol mesuré par les TDR et précipitations (mm) à proximité, saison 2022. Caractérisation physico-chimique de l'engrais organique.

CARACTÉRISATION DE L'ENGRAIS ORGANIQUE ET APPORT DE C LABILE AU SOL

Les deux années, la caractérisation de l'engrais organique (EO) Acti-Sol révèle un produit à fort potentiel de minéralisation (élevée à très élevée) avec un C/N et un ISB bas, tel que reconnu pour ce type de matériel (fientes séchées de poules) (Tableau 4). Le contenu en C labile (C_{eau}) est élevé, particulièrement en 2021, comptant pour près du quart du C organique total (C_{tot}). En ce qui a trait au potentiel azoté, les contenus en N_{total} sont similaires les deux années, soit en moyenne $48,4 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ t}^{-1}$ de produit. Tel qu'attendu, la proportion en nitrate ($N\text{-NO}_3$) est négligeable, le N minéral disponible à la culture étant sous forme d'ammonium ($N\text{-NH}_4$) dont les contenus ($1,9 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ t}^{-1}$) restent somme toute faibles (4 %) au regard du N_{total} . Le ratio $N_{\text{total}}/P_{\text{total}}$ est élevé pour un engrais organique issu de déjections animales, soit en moyenne des deux années 3,3. De plus, très peu de ce P est sous forme assimilable par les plantes, soit en moyenne 7 % de $P_{\text{eau}}/P_{\text{total}}$. Le ratio $N_{\text{total}}/K_{\text{total}}$ est également élevé, en moyenne de 2,2 pour les deux saisons. Ces ratios entre les éléments majeurs permettent des apports élevés de N sans trop charger le système en phosphore et apportant une quantité intéressante de potassium, élément important dans la culture de la fraise. L'apport d'EO dans un but de hausser le C labile du sol permet donc, sur la base du N_{total} visé, de combler également une bonne partie des besoins en K.

Tableau 4. Caractérisation physico-chimique de l'engrais organique, 2021 et 2022.

Paramètres	Acti-Sol (2021)	Acti-Sol (2022)
Acidité (pH)	7,1	7,5
Matière sèche (%)	89	89
Matière organique (%)	65	62
Carbone organique total (C_{tot}) ($kg\ t^{-1}$)	325	310
Carbone soluble à l'eau (C_{eau}) ($kg\ t^{-1}$)	77	41
C_{eau} / C_{tot} (%)	24	13
N total (N_{total}) ($kg\ t^{-1}$)	51	46
Azote ammoniacal (N-NH ₄) ($kg\ t^{-1}$)	1,9	1,9
Azote nitrate (N-NO ₃) ($kg\ t^{-1}$)	0,14	0,15
NH ₄ /N _{total} (%)	3,7	4,1
N _{total} /P _{total}	3,4	3,3
P total (P_{total}) ($kg\ t^{-1}$)	14,8	14,0
P soluble (P_{eau}) ($kg\ t^{-1}$)	1,24	0,77
P_{eau} / P_{total} (%)	8,3	5,5
K total (K_{total}) ($kg\ t^{-1}$)	24	20
N _{total} / K _{total}	2,1	2,3
C/N	6,4	6,7
Niveau de minéralisation	Forte minéralisation	Forte minéralisation
Disponibilité de l'azote	Élevée à très élevée	Élevée à très élevée
Indice de stabilité biologique (%)	13,3	8,9

En comparant les résultats de caractérisation de 2021 et de 2022 de l'EO, il apparaît que les contenus en éléments semblent assez similaires, sauf celui en C labile. En effet, le contenu en C_{eau} de 2022 est près de la moitié de celui de 2021 ($2022\ C_{eau}/2021\ C_{eau} = 53\ %$) (Tableau 4). Ceci n'est pas idéal puisque le projet se penche principalement sur l'impact de l'ajout du C labile au sol sur la base des apports de N_{eff} . Cependant, puisque le contenu en N_{eff} de l'EO en 2022 était également moindre, des quantités plus élevées d'EO ont été appliquées. La différence n'a toutefois pas été assez grande pour égaliser les apports les deux années (Tableau 5). Au final, les apports de C labile ont donc été de 1,32 à 1,63 plus élevés en 2021, en comparaison de 2022. Cela dit, il demeure que des quantités élevées de C labile ont été incorporées dans les buttes les deux années, de $100\ kg\ ha^{-1}$ et plus, ce qui permet l'étude de son impact.

Tableau 5. Apport de C labile selon les traitements de fertilisation, saisons 2021 et 2022.

Traitements			Acti-Sol appliqué ($t\ ha^{-1}$)		C labile (C_{eau}) appliqué ($kg\ ha^{-1}$)		
			2021	2022	2021	2022	2021/2022
T1	T6	Témoin ON	-	-	-	-	-
T2	T7	Producteur	-	-	-	-	-
T3	T8	~ 40 % N_{org}^1	0,7	1,0	54	41	1,32
T4	T9	~ 70 % N_{org}	1,4	1,9	109	76	1,42
T5	T10	100 % N_{org}	2,1	2,4	163	100	1,63

DÉVELOPPEMENT ET NUTRITION DE LA CULTURE

Biomasses des plants

En 2021, les masses de plants ont été faibles en comparaison de la taille usuelle des plants aux diverses périodes dans la saison. Ceux-ci ont donc atteint au final une taille deux fois moindre qu'en 2022. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce moins bon développement (voir section sur les rendements). Malgré cette différence, les deux années, la fumigation a été l'élément qui a le plus influencé la production de biomasse par les plants (Figures 9 et 10), la fertilisation n'ayant eu qu'un impact mineur. En effet, en 2021, seul le traitement ON se distingue des autres régies fertilisées (données non présentées) (Témoin ON : 10,6 g plant⁻¹ vs. 13,1 g plant⁻¹ (moyenne des autres traitements), toutes fumigations confondues). De même, en 2022, la fertilisation n'a eu aucun impact sur les plants fumigés. Parmi les plants non fumigés, seuls les plants de la régie témoin ON et ceux de la régie ~ 70 % N_{org} présentent entre eux des masses statistiquement différentes, de 22 %. Les autres régies avec N_{org} n'entraînant pas de hausse de masse des plants, ni en comparaison du témoin ON, ni de la régie Producteur. Il est ainsi intéressant de constater que les deux saisons, les fertilisations avec N_{org} ne produisent pas des plants de masses inférieures à celle de la régie Producteur. De plus, les deux saisons, ce sont les rendements totaux commercialisables des régies Producteur et ~ 70 % N_{org} qui sont les plus élevés (voir section sur les rendements; Tableau 6Tableau 1). À l'opposé, l'effet fumigant est très significatif et consistant sur les deux années et a conduit à des plants plus gros au terme de la saison (Figures 9 et 10). Ce sont aussi les plants fumigés qui ont donné le plus haut rendement total (voir section sur les rendements).

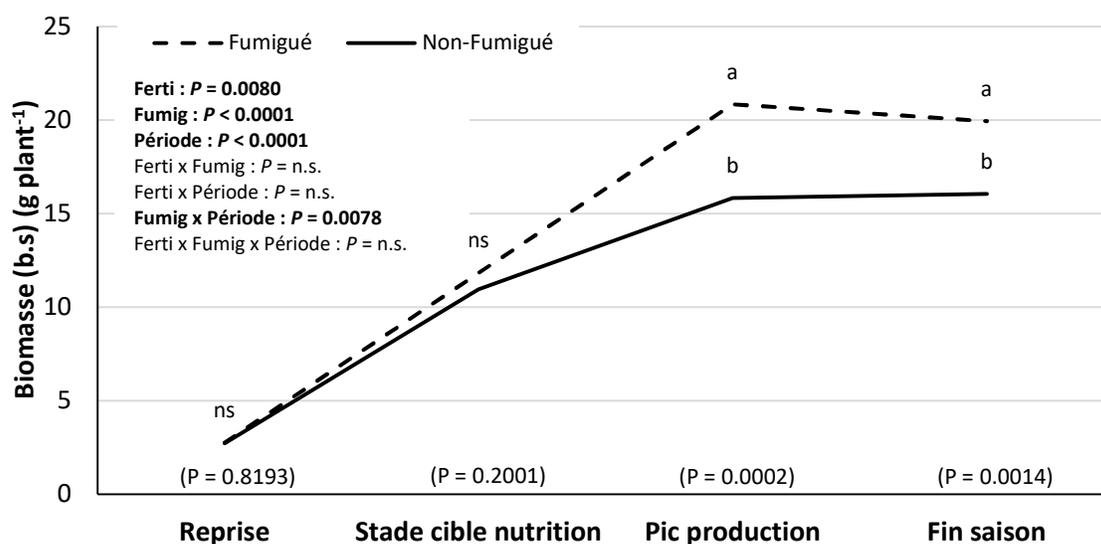


Figure 9. Biomasses sèches des plants aux différents stades cibles de la production, selon l'apport ou non de fumigation, tout traitement de fertilisation confondu, saison 2021.

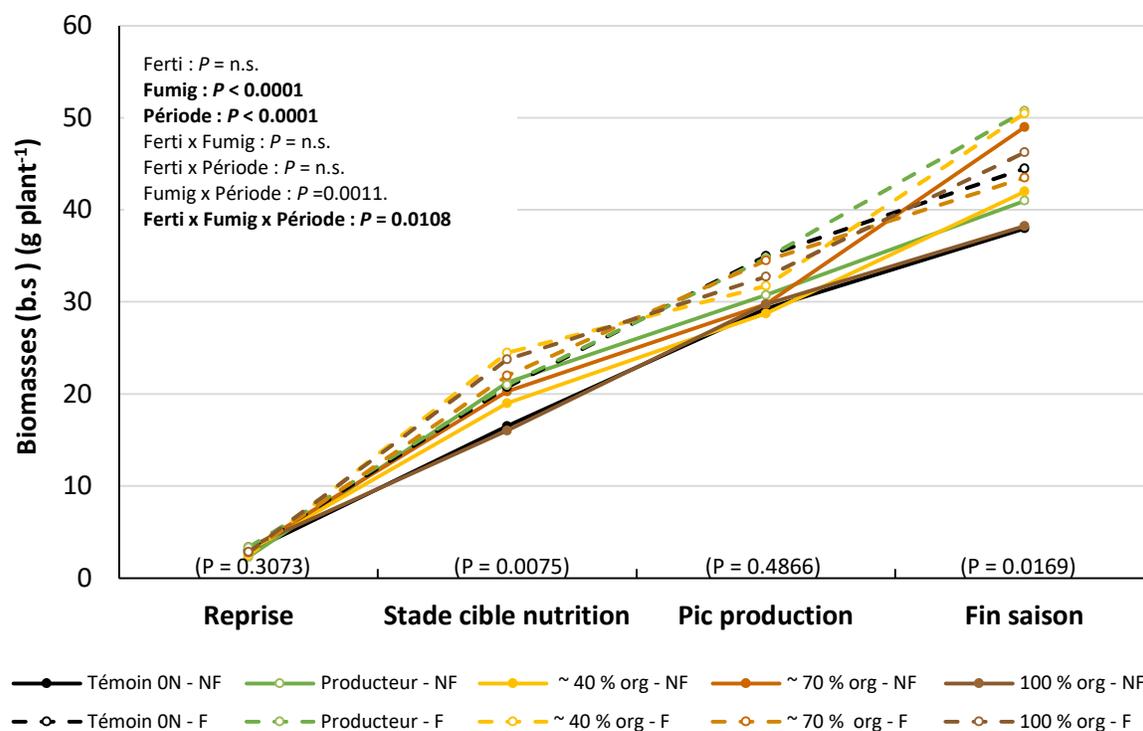


Figure 10. Biomasses sèches des plants aux différents stades cibles de la production, selon les différentes régies de fertilisation et de fumigation à l'étude, saison 2022.

Rendements vendables totaux et périodiques en fruits

Les résultats de rendements en fruits doivent être analysés en considérant que les rendements de la saison 2021 ont été anormalement faibles, atteignant en moyenne 68 % de ceux de 2022. Plusieurs facteurs peuvent être considérés pour expliquer cette baisse de rendement, en comparaison des valeurs usuelles. En 2021, le champ présentait un sol plutôt lourd, avec risques de développement de pourriture des racines, tel qu'il a pu être observé en fin de saison sur certains plants. De plus, devant les besoins grandissant en irrigation, le lac d'irrigation connecté à ce champ et le champ voisin a été agrandi lors de la saison 2021 et les deux champs semblent en avoir été affectés, probablement à cause du brassage de la terre dans le bassin (eau chargée de sédiments). Enfin, le piégeage a révélé la présence de cicadelles pouvant avoir ralenti le développement des plants.

Dans ces conditions adverses, la contribution de la fertilisation minérale, fournissant du N directement disponible, en comparaison du N organique de l'EO qui doit être minéralisé dans le sol pour fournir du nitrate, peut avoir été haussée. Autrement dit, il se peut que le sol ait présenté une fonctionnalité perturbée de production de nitrate à partir du N organique de l'EO. Ceci expliquerait que la fertilisation 100 % organique, dont l'efficacité repose entièrement sur la fonctionnalité du système sol, a moins bien performé en 2021 qu'en 2022 (2021 : 86 % vs. 2022 : 97 % du rendement Producteur). Le traitement témoin ON, dont la fourniture en azote repose également sur la production de N disponible par le sol, a aussi été très affecté (2021 : 66 % vs. 2022 : 87 % du

rendement Producteur). La fertilisation 100% organique a ainsi tout de même fait significativement mieux que le traitement ON (Tableau 6) et les fertilisation mixtes (40 % et 70 %) ont produit des rendements similaires à celui du traitement Producteur. En 2022, sous de meilleures conditions de sol, il peut être dit que toutes les fertilisations organiques ont produit un rendement équivalent au traitement Producteur (92 – 100 % vs. rendement Producteur) puisque le rendement du traitement témoin ON est statistiquement inférieur.

Il demeure cependant que les deux saisons, c'est la fumigation qui a le plus fortement influencé les rendements, avec des gains de 20 % et 15 % en 2021 et 2022, respectivement, en comparaison des rendements des plants non fumigés (Tableau 6). Ainsi, les plants fumigés ont produit les deux années environ 60 g plant⁻¹ de plus que les plants non fumigés. Puisque les deux saisons, l'interaction fumigation x fertilisation est non significative, il semble donc que même apporté en grandes quantités (41 à 163 kg ha⁻¹), le C labile ne semble pas avoir eu d'effet fumigant, car dans ce cas, l'effet de la fumigation aurait été plus grande pour les plants sans ou avec moins d'apports de C labile.

Tableau 6. Rendements totaux commercialisables (fruits g /plant) en pourcentage relatif à la régie Producteur, selon les diverses régies de fertilisation et de fumigation en 2021 et 2022.

Traitements	2021	2022
Fertilisation (toutes fumigations confondues) ¹		
Témoin ON	66 c	87 b
Producteur	100 a	100 a
~ 40 % org	91 b	92 ab
~ 70 % org	93 ab	100 a
100 % org	86 b	97 ab
Fumigation (toutes fertilisations confondues) ¹		
Fumigé	100 a	100 a
Non Fumigé	80 b	86 b
ANOVA (valeurs de P)		
Ferti :	< 0.0001	0.0948
Fumig :	< 0.0001	< 0.0001
Ferti x Fumig :	n.s.	n.s.

¹ En absence d'interaction significative Ferti x Fumig, les résultats sont présentés soit par niveau de fertilisation ou par niveau de fumigation, tous autres traitements confondus.

Outre les rendements de fin de saison, la productivité des plants par période de production est également importante puisque les prix sur le marché sont plus intéressants à certains moments de l'année. Tel que présenté pour le rendement total, c'est la fumigation qui a eu de loin le plus d'impact sur le rendement aux trois moments de prise de mesure (juillet, août, septembre) et ce, sans interaction avec la fertilisation (Tableau 7). Il est intéressant de noter que la différence entre les plants fumigés ou non augmente dans le temps. En 2021, dans un champ ayant présenté de la maladie, l'écart passe de 8 % à 37 %. En 2022, la différence évolue de 9 % à 20 %. L'impact de la fumigation est donc d'autant plus important que la saison est avancée. Ceci porte à conséquence,

car plus de 80 % du rendement commercialisable totale est récolté dans les mois d'août (60 - 65 % du rendement total) et septembre (21 - 22 % du rendement total).

En ce qui a trait à la fertilisation, celle-ci n'a influencé le rendement périodique qu'en 2021. L'analyse par période révèle cependant que le type de fertilisation a eu un impact principalement en août au pic de production. Bien que cet effet ne touche qu'une seule période, il s'applique sur 60 % de la production. À ce moment, l'apport de 40 ou 70 % du N total sous forme organique n'entraîne pas de baisse de rendement, mais recourir à 100 % à l'EO entraîne une perte significative de 16 %, en comparaison de la régie Producteur. Pour les périodes de juillet et de septembre, les rendements sont statistiquement égaux quel que soit le ratio N organique/N total de la fertilisation apportée. En 2022, il n'est pas possible de statuer sur l'impact périodique du type de fertilisation, car le site n'a démontré aucune réponse à celle-ci (rendement du Témoin ON non statistiquement différent de ceux des plants fertilisés). En absence de réponse, il ne faut pas conclure que les fertilisations organiques font aussi bien que la fertilisation minérale Producteur, mais que le site présente la capacité de fournir tout le N nécessaire. Une différence de 13 % sur le rendement total avait pourtant été mesurée entre les traitements ON et Producteur (Tableau 6), probablement attribuable au cumul des écarts de rendement de chaque période.

Tableau 7. Rendements commercialisables (fruits g plant⁻¹) en saison en pourcentage relatif à la régie du producteur, selon les diverses régies de fertilisation et de fumigation en 2021 et 2022.

Traitements	2021			2022		
	Juillet	Août	Septembre	Juillet	Août	Septembre
Fertilisation (toutes fumigations confondues) ¹						
Témoin ON	66 b	62 c	79 c	85	87	85
Producteur	100 a	100 a	100 a	100	100	100
~ 40 % org	94 a	90 ab	90 ab	83	93	95
~ 70 % org	100 a	88 ab	100 a	95	101	99
100 % org	99 a	84 b	82 ab	90	96	104
Fumigation (toutes fertilisations confondues) ¹						
Fumigé	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a	100 a
Non Fumigé	92 b	84 b	63 b	91 b	86 b	80 b
ANOVA (valeurs de P) ²						
Ferti :		0.0007			0.0847	
Fumig :		<.0001			<.0001	
Ferti x période :		0.0017			0.6445	
Fumig x période :		<.0001			0.0686	
Effet par période						
Ferti :	< 0.0001	< 0.0001	0.0585	= n.s.	= n.s.	= n.s.
Fumig :	0.0023	< 0.0001	< 0.0001	= 0.0068	< 0.0001	< 0.0001

¹ En absence d'interaction significative Ferti x Fumig, les résultats sont présentés soit par niveau de fertilisation ou par niveau de fumigation, tous autres traitements confondus. ² Absence d'interaction Ferti. x Fumig et Ferti. x Période x Fumig.

Calibre, périmètre du collet et verticilliose

La fertilisation a eu peu d'effet sur le calibre des fruits, la principale différence étant de moins de 1 g (0,8 à 0,9 g d'écart) et uniquement entre les plants Témoins ON et ceux fertilisés en azote. Le type de fertilisation a donc eu peu d'impact puisque seuls les plants fertilisés de 2021 montrent une différence entre eux selon la présence ou non de N_{org} et cela, sans impact de la proportion N_{org}/N_{total} . Ainsi, les plants fertilisés avec une part de N_{org} présentaient en moyenne un calibre de 12,6 g contre 13,0 g pour la régie Producteur, ce qui demeure une faible différence (3 %). L'impact de la fumigation a également été limité les deux années (Tableau 8), en permettant l'obtention de fruits en moyenne 5-6 % plus gros. La fumigation a cependant eu un effet significatif sur le périmètre du collet et le pourcentage de plants atteints de verticilliose, contrairement à la fertilisation qui n'a pas influencé ces variables. Les plants fumigés avaient ainsi un périmètre du collet 7 % et 11 % plus élevé en 2021 et 2022, respectivement, mais surtout, les plants fumigés étaient relativement épargnés par la verticilliose (0,3 % des plants) tandis que ceux non fumigés étaient 7 fois plus atteints (Tableau 8).

Tableau 8. Calibre moyen, périmètre du collet et proportion de plants atteints de verticilliose selon la fumigation et la fertilisation, saison 2021 et 2022.

Traitements	Calibre moyen (g)		Périmètre du collet (cm)		Plants verticilliosés (%) ¹
	2021	2022	2021	2022	2022
Fertilisation (toutes fumigations confondues) ²					
Témoin ON	12,1 c	13,6 b			
Producteur	13,0 a	14,4 a			
~ 40 % N_{org}	12,5 b	14,1 ab			
~ 70 % N_{org}	12,8 ab	14,1 a			
100 % N_{org}	12,4 bc	14,0 ab			
Fumigation (toutes fertilisations confondues) ²					
Fumigé	12,9 a	14,5 a	9,4 a	14,6 a	0,3 a
Non Fumigé	12,2 b	13,6 b	8,4 b	13,7 b	2,1 b
ANOVA (valeurs de P)					
Ferti :	0.0042	0.0690	n.s.	n.s.	n.s.
Fumig :	<.0001	<.0001	0.0207	0.0027	0.0367
Ferti x Fumig :	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

¹ Donnée indisponible pour l'année 2021. ² En absence d'interaction significative Ferti x Fumig, les résultats sont présentés soit par niveau de fertilisation ou par niveau de fumigation, tous autres traitements confondus.

Statut nutritionnel

Les deux années, la fertilisation a peu influencé la teneur foliaire en éléments majeurs. Les effets significatifs sont principalement reliés à des valeurs inférieures pour les plants des traitements ON et 100 N_{org} les deux saisons. Toutefois, pour toutes les régies, les valeurs demeurent dans l'intervalle souhaitées. Ainsi, aucune régie ne cause une teneur en N sous la valeur minimale critique. Pour sa part, la fumigation a eu un impact pour tous les éléments, les deux années, sauf le P en 2021. Cependant, dans tous les cas, les différences sont faibles (moins de 10 %) et les valeurs à l'intérieure de l'intervalle de suffisance recommandée (CRAAQ 2010) (Tableau 9).

Tableau 9. Statut nutritionnel des plants (folioles) selon la fumigation et la fertilisation, saisons 2021 et 2022.

Traitements	N (%)		P (%) ¹		K (%) ¹		
	2021	2022	2021	2022	2021	2022 ²	
Fertilisation (toutes fumigations confondues)²							
Témoin ON	2,32 b	2,35 b					
Producteur	2,48 a	2,50 a					
~ 40 % N _{org}	2,43 a	2,38 ab					
~ 70 % N _{org}	2,51 a	2,44 ab					
100 % N _{org}	2,45 a	2,36 b					
Fumigation (toutes fertilisations confondues)²							
Fumigés	2,52 a	2,48 a	0,31	0,30 a	2,0 a	1,7 a	
Non Fumigés	2,36 b	2,33 b	0,31	0,28 b	1,8 b	1,6 b	
Intervalle de suffisance VMC-VCE³							
	1,4 - 3,2		0,17 - 0,34		1,1 - 1,9		
ANOVA (valeurs de P)							
	Ferti :	0.0081	0.0409	n.s.	0.0417	n.s.	n.s.
	Fumig :	<.0001	0.0006	n.s.	0.0002	<.0001	0.0047
	Ferti x Fumig :	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.0309

¹ L'effet de la fertilisation étant majoritairement non significatif sur les teneurs en P et K, les moyennes par niveau de traitements ne sont pas présentées. ² En absence d'interaction significative Ferti x Fumig, les résultats sont présentés soit par niveau de fertilisation ou par niveau de fumigation, tous autres traitements confondus. ³ Valeur minimale critique et valeur critique d'excès selon Tableau 8.5 Guide CRAAQ. Noter qu'il s'agit des valeurs pour la fraise traditionnelle en rangs nattés puisque le Québec ne dispose pas de valeur référence pour la fraise à jours neutres.

ÉVALUATION DE LA SANTÉ GLOBALE DU SOL

Tel qu'expliqué précédemment (sites d'essais), les champs d'essai avaient été sélectionnés sur la base de leurs rendements plus faibles, suggérant un moins bon état de santé de ceux-ci. La cote de santé sol global AEL obtenue confirme cette faible santé (Tableau 10). Cependant, une partie de cette faible cote globale repose sur la nature du sol, très graveleux. Ceci entraîne une cote très basse pour certains aspects physiques qui tirent la moyenne vers le bas, mais qui ne sont pas dus à une dégradation de l'état du sol. Cependant, il demeure que peu de paramètres dépassent les 70/100 et que tous les paramètres biologiques sont également bas, ce qui valide le choix des sites pour un essai sur le C labile puisque l'apport de C labile vise essentiellement à hausser la réserve en cet élément et à favoriser l'activité biologique des microorganismes qui s'en nourrissent. Il est donc intéressant que la faible cote globale de santé repose aussi sur les faibles valeurs de respiration (CO₂ Solvita), d'azote labile (Solvita) et de carbone actif (extrait au permanganate de potassium; POXC).

Tableau 10. Cote de santé globale des sols des sites au printemps au moment de la mise en place de l'essai, saisons 2021 et 2022.

Paramètres	Site 2021		Site 2022	
		Note / 100		Note / 100
Paramètres physiques				
Stabilité des agrégats (%)	38	31	50	49
Proportion d'agrégats (%)	59	3	74	11
Réserve en eau utile (%)	7,2	5	11	20
MO (%)	3,9	68	5,4	84
Paramètres chimiques				
pH	5,9	63	5,7	48
P (kg ha ⁻¹)	255	92	221	84
K (kg ha ⁻¹)	450	69	442	68
Ca (kg ha ⁻¹)	3716	32	3129	24
Mg (kg ha ⁻¹)	283	34	242	28
CEC (meq/g)	21,5	-	22,1	-
Paramètres biologiques				
Respiration CO ₂ Solvita (ppm)	41	42	28	33
Azote labile Solvita (kg ha ⁻¹)	154	32	301	54
Carbone actif (ppm) ¹	398	6	535	21
NOTE GLOBALE DE SANTÉ²		39		45

¹ Le carbone extrait au permanganate de potassium (POXC) est un carbone labile dit carbone actif. Il représente un pool de C labile plus grand car l'extractif utilisé, le permanganate de potassium, est plus fort que l'extraction à l'eau (C_{eau}). ² La note globale est basée sur l'ensemble des notes obtenues pour chacun des paramètres physiques, chimiques et biologiques.

Plus tard en saison, à deux périodes (stade cible de nutrition [68 jrs après buttage] et de pic de production [104 jrs après buttage]), certains indicateurs biologiques de santé des sols ont à nouveau été dosés. Ainsi, le potentiel d'activité biologique du sol a été estimé via la mesure du taux respiratoire microbien selon deux méthodes, une méthode rapide (sol sec, Solvita 24 hrs) et longue durée (sol humide, 10 jours). Globalement, le constat est le même avec les deux méthodes, soit que l'apport de C labile via l'engrais organique n'a pas permis de hausser le taux d'activité biologique du sol (effet Ferti = n.s.) (Tableau 11). Cependant, une interaction a été mesurée entre la fumigation et la fertilisation au pic de production en 2021. Durant cette période, qui est tout de même importante au regard du rendement final, le taux respiratoire est très uniforme dans les sols non fumigés, en moyenne de 26 mg CO₂ kg⁻¹. Par contre, dans les sols fumigés, le taux respiratoire devient très variable. Le sol de la régie Producteur présente le taux le plus réduit, tandis que les sols des régies mixtes ~ 40 et ~ 70 % de N_{org} présentent les taux les plus élevés, du double du sol de la régie Producteur. Le taux d'activité des régies mixtes semblait aussi de 30 % plus élevé, en comparaison du sol Témoin ON. Cependant, la différence n'est pas ressortie significative. De plus, apporter 100 % du N sous forme organique n'a pas permis de faire mieux que la régie Producteur ou Témoin. Les résultats de cette période démontrent que dans certaines circonstances, l'apport de C labile en combinaison avec du N minéral contribue à hausser l'activité biologique des sols fumigés. Dans le cas de la fumigation, l'impact est majeur, mais diminue avec le temps. Le taux

d'activité biologique est plus bas dans les sols stérilisés, jusqu'à 1,7 fois moins en début de saison (Tableau 11).

Tableau 11. Taux d'activité biologique du sol exprimé par respiration microbienne selon le stade de développement de la culture, la fertilisation et la fumigation, saisons 2021 et 2022.

Traitements	CO ₂ Solvita (mg CO ₂ kg ⁻¹)				CO ₂ incubation 10 jours (mg CO ₂ g ⁻¹)	
	Stade cible nutrition		Stade pic production		Stade cible nutrition	
	2021	2022	2021 ¹	2022	2021	2022
Régies nutritives						
Témoin ON			24,0 a			
Producteur			25,8 a			
~ 40 % N _{org}	NF ²		29,5 a			
~ 70 % N _{org}			24,3 a			
100 % N _{org}			28,5 a			
Témoin ON			23,8 a			
Producteur			14,5 b			
~ 40 % N _{org}	F		30,3 a			
~ 70 % N _{org}			31,3 a			
100 % N _{org}			20,3 ab			
Fumigation (toutes fertilisations confondues)³						
Fumigé	18,4 b	19,5 b	22,2 b	18,1 b	0,14 b	0,17 b
Non Fumigé	32,5 a	23,2 a	26,4 a	21,4 a	0,17 a	0,19 a
ANOVA (valeurs de P)						
Ferti :	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Fumig :	<.0001	0.0057	0.0048	0.0060	0.0018	0.0172
Ferti x Fumig :	n.s.	n.s.	0,0107	n.s.	n.s.	n.s.

¹ En présence d'une interaction significative, les résultats sont présentés par niveau de fertilisation en fonction de la fumigation. ² Fumigés : F. Non fumigés : NF. ³ En absence d'interaction significative Ferti x Fumig, les résultats sont présentés soit par niveau de fertilisation ou par niveau de fumigation, tous autres traitements confondus.

Les résultats des mesures du contenu en N labile du sol indiquent que globalement, tant la fumigation que les apports d'EO par fertilisation haussent les teneurs en N labile du sol (Tableau 12). L'impact de la fumigation passe probablement par la destruction des microorganismes présents dans le sol, dont le N_{org} devient ainsi extractible, tandis que l'impact de la fertilisation découle plutôt d'un apport comme tel de N labile (Tableau 12). En 2021, les effets de la fumigation et de la fertilisation sont indépendants (interaction Ferti x Fumig = n.s.). Ainsi, les sols fumigés contiennent 1,6 et 1,3 fois plus de N labile aux stades cibles de nutrition et de pic de production, respectivement, que les sols non traités. Par ailleurs, sans égard à la fumigation, les contenus en N labile forment un gradient allant de plus élevé dans les sols avec apport de C labile, suivi du sol de la régie Producteur, puis du sol Témoin ON. En 2022, la fumigation interagit avec la fertilisation (interaction Ferti x Fumig : significative). La fumigation hausse les contenus en N labile, mais l'apport d'EO n'a un impact significatif que dans les sols fumigés, surtout au 1^{er} stade de mesure (stade nutrition).

Au stade cible de nutrition, l'incubation de sol (production de N-NO₃ sur 10 jours) suggère que c'est principalement, sur les deux années, la fertilisation qui modifie la production de nitrate. Celle-ci est

la plus élevée dans les régies mixtes (~ 40 % et ~ 70 % N_{org}), en comparaison des sols Témoin ON et régie Producteur. En 2021, un effet de la fumigation est également mesuré. Ce résultat, qui ne se répète pas en 2022, est difficile à expliquer puisque la production de nitrate à partir de N_{org} repose sur l'activité microbienne et que la mesure du CO₂ a démontré que la respiration microbienne y est moindre (Tableau 11). Enfin, dans le cas des contenus en C labile (POXC), un impact des traitements n'est mesuré qu'en 2022, avec une interaction significative entre la fumigation et la fertilisation. C'est principalement l'apport d'EO par la fertilisation qui hausse les teneurs en POXC par rapport aux traitements Témoin ON et régie Producteur, et davantage dans les sols non fumigés (Figure 11).

Tableau 12. Contenu en azote labile et potentiel de production d'azote par minéralisation, selon le stade de développement de la culture, la fertilisation et la fumigation, saisons 2021 et 2022.

Traitements	N labile Solvita (kg ha ⁻¹)				Δ N-NO ³ (0-10 jrs) (kg ha ⁻¹)	
	Stade cible nutrition		Stade pic production		Stade cible nutrition	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
Régies nutritives¹						
Témoin ON		286 abc		293 abc		
Producteur		272 c		277 bc		
~ 40 % N _{org}	NF ²	255 c		244 c		
~ 70 % N _{org}		324 abc		304 abc		
100 % N _{org}		309 abc		304 abc		
Témoin ON		290 bc		300 abc		
Producteur		327 ab		339 a		
~ 40 % N _{org}	F	364 a		303 abc		
~ 70 % N _{org}		357 a		338 ab		
100 % N _{org}		305 abc		291 abc		
Fertilisation (toutes fumigations confondues)³						
Témoin ON	133 c		131 c		11,5 c	6,4 b
Producteur	151 bc		155 b		16,9 bc	12,0 ab
~ 40 % N _{org}	190 ab		162 b		31,6 a	26,3 a
~ 70 % N _{org}	204 a		183 a		26,5 ab	26,7 a
100 % N _{org}	181 ab		158 b		21,1 ab	11,2 ab
Fumigation (toutes fertilisations confondues)³						
Fumigé	209 a		180 a		28 a	
Non Fumigé	135 b		135 b		15 b	
ANOVA (valeurs de P)						
Ferti :	0.0115	n.s.	0.0013	n.s.	0.0018	0.0444
Fumig :	<.0001	<.0001	<.0001	0.0111	0.0008	n.s.
Ferti x Fumig :	n.s.	0.0005	n.s.	0.0392	n.s.	n.s.

¹ En présence d'une interaction significative, les résultats sont présentés par niveau de fertilisation en fonction de la fumigation. ² Fumigés : F. Non fumigés : NF. ³ En absence d'interaction significative Ferti x Fumig, les résultats sont présentés soit par niveau de fertilisation ou par niveau de fumigation, tous autres traitements confondus.

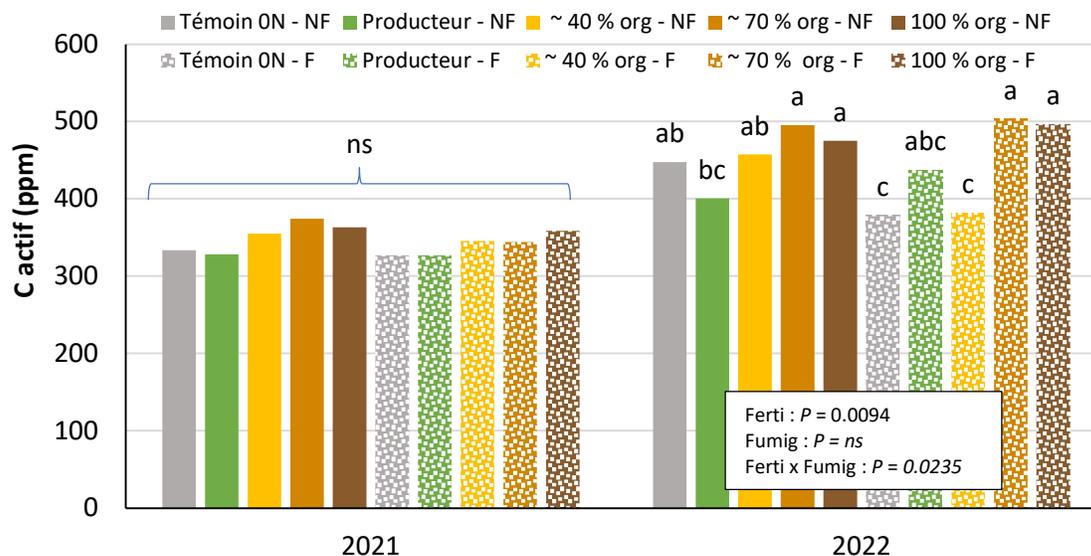


Figure 11. Contenu en carbone actif (POXC) du sol au stade cible nutrition, selon le stade de développement de la culture, la fertilisation et la fumigation, saisons 2021 et 2022.

Au stade cible de nutrition des fraisières, l'évaluation de la cote de santé, basée sur les paramètres biologiques, a de nouveau été calculée. Celle-ci est donc basée sur la note globale pondérée de la respiration Solvita, du N labile Solvita et du carbone POXC, tous étudiés séparément. Intégrées dans un seul indicateur, ces mesures indiquent que l'apport de C labile par l'EO améliore la cote de santé biologique, sans interaction avec la fumigation. Les deux années, la cote est plus basse pour les sols du Témoin ON et de la régie Producteur, et augmente avec l'accroissement des doses d'EO. La différence n'est pas toujours significative au seuil de $P \leq 0.05$, mais la tendance est bien marquée malgré le fait qu'il s'agit d'une première application dans ce champ. Il peut donc être émis comme hypothèse que des apports répétés pourraient améliorer sur le court et moyen terme la santé du sol. Au stade pic de production, la stabilité des agrégats a aussi été mesurée dans les traitements Producteur et 100 % N_{org} . L'ajout de C labile aurait pu augmenter l'agrégation en stimulant le développement des hyphes microbiens, des bactéries bénéfiques et des exsudats racinaires. Cependant, aucun effet n'a été mesuré.

Tableau 13. Cote de santé du sol (AEL) selon les paramètres biologiques (CO_2 Solvita, N labile Solvita, C actif) au stade cible nutrition, selon le type de fertilisation, toutes fumigations confondues, saisons 2021 et 2022.

Traitement	2021	2022
Témoin ON	19 b	28 b
Producteur	22 ab	29 b
~ 40 % N_{org}	23 ab	29 b
~ 70 % N_{org}	24 a	35 a
100 % N_{org}	24 a	33 ab
ANOVA (valeurs de P)		
Ferti :	0.0369	0.0543
Fumig :	n.s.	n.s.
Ferti x Fumig :	n.s.	n.s.

L'analyse du sol des buttes, une fois la récolte terminée, indique que la régie de fertilisation et la fumigation ont joué sur son contenu en nitrate résiduel (azote sous forme de nitrate : N-NO₃). Il en ressort, les deux années, que l'impact de la fertilisation est surtout marqué entre le sol Témoin, pratiquement dépourvu de N-NO₃ résiduel, en comparaison des sols fertilisés en N, les sols fertilisés au N minéral ou au N_{org} présentant des teneurs équivalentes. Cela n'est pas surprenant, car le nitrate non prélevé est facilement lessivé par les épisodes d'irrigation qui sont les mêmes dans tous les traitements et parce que la méthode employée dose le nitrate minéral et pas le N_{org} en réserve, plutôt associé au potentiel de production de nitrate du sol. La seule valeur qui se détache est le sol de la régie ~ 70 % N_{org} avec une valeur de 64,9 mg kg⁻¹. L'analyse des données par parcelles indique cependant que cette moyenne élevée repose sur deux données très influentes du traitement ~ 70 % N_{org} fumigé (T9) de plus de 120 mg kg⁻¹, alors que les autres données de la régie ~ 70 % N_{org} sont similaires à celles des autres sols fertilisés (données entre 17-49 mg kg⁻¹). De plus, les deux saisons, les valeurs pour la régie 100 % N_{org} ne sont pas plus élevées que les autres. Il apparaît donc plus probable que l'apport de N sous forme organique n'entraîne pas plus de nitrate résiduel que le N minéral fertiligué. Par ailleurs, une année sur deux, davantage de nitrate résiduel a été dosé dans les sols fumigés.

Tableau 14. Contenu en nitrate résiduel post-récolte, selon la fertilisation et la fumigation, saisons 2021 et 2022.

Traitement	N-NO ₃ (mg kg ⁻¹)	
	2021	2022
Fertilisation (toutes fumigations confondues) ¹		
Témoin ON	1,9 b	1,9 c
Producteur	11,3 a	30,5 ab
~ 40 % N _{org}	17,7 a	28,6 ab
~ 70 % N _{org}	16,3 a	64,9 a
100 % N _{org}	11,9 a	26,5 b
Fumigation (toutes fertilisations confondues) ¹		
Fumigé	15,7 a	
Non Fumigé	8,0 b	
ANOVA (valeurs de P)		
Ferti :	0.0055	0.0005
Fumig :	0.0076	n.s.
Ferti x Fumig :	n.s.	n.s.

¹ En absence d'interaction significative Ferti x Fumig, les résultats sont présentés soit par niveau de fertilisation ou par niveau de fumigation, tous autres traitements confondus.

RENSEIGNEMENTS ÉCONOMIQUES

Le Tableau 15 présente les coûts des intrants (engrais granulaires, solubles et Acti-Sol) associés à la régie nutritive, selon que les sols aient été fumigés ou non, en comparaison du gain de rendement obtenu par rapport à la régie Producteur non fumigée. Ces coûts n'incluent pas le temps de la main-d'œuvre pour effectuer les fertigations (mélange et injection). Ce temps est difficile à estimer et est

très variable selon les entreprises. De plus, même dans les régies avec 100 % de N_{org} , des fertigation sont apportées pour le potassium et le calcium (voir Annexe 1). De plus, la régie Témoin ON n'est pas montrée puisqu'il s'agit d'une régie qui ne sera jamais utilisée par l'entreprise.

Tableau 15. Coûts associés aux différentes régies de fertilisation et de fumigation, en comparaison du gain de rendement obtenu par rapport à la régie Producteur non fumigé pour les saisons 2021 et 2022.

Régies ¹	2021		2022		Moyenne 2021-2022	
	Coûts ² (\$ ha ⁻¹)	R. Rel. ³ (%)	Coûts (\$ ha ⁻¹)	R. Rel. (%)	Coûts (\$ ha ⁻¹)	R. Rel. (%)
Producteur	1 132 \$	100	1 534 \$	100	1 333 \$	100
~ 40 % N_{org}	983 \$	91	1 291 \$	92	1 137 \$	92
~ 70 % N_{org}	1 193 \$	93	1 502 \$	100	1 348 \$	97
100 % N_{org}	1 370 \$	86	1 523 \$	97	1 447 \$	92
Producteur	2 277 \$	119	2 774 \$	118	2 526 \$	119
~ 40 % N_{org}	2 128 \$	111	2 531 \$	105	2 330 \$	108
~ 70 % N_{org}	2 338 \$	109	2 742 \$	117	2 540 \$	113
100 % N_{org}	2 514 \$	105	2 763 \$	114	2 639 \$	110

¹ Fumigés : F. Non fumigés : NF. ² Coûts des engrais minéraux et organiques et de la fumigation lorsque appliquée. ³ Rendement relatif en comparaison de celui obtenu avec la régie Producteur sur sol non fumigé.

Il en ressort que la fumigation permet un gain de rendement pour toutes les régies, en comparaison de la régie Producteur non fumigée dans un contexte de sol présentant une cote de santé inférieure et une incidence de maladie élevée. Ainsi, malgré un coût plus élevé, la marge sur coût variable (MCV) est plus élevée pour toutes les régies fumigées (Tableau 16). En moyenne sur les deux saisons, la régie Producteur fumigée produit la meilleure MCV (+17,5 %). Cependant, la régie apportant ~ 70 % N_{org} fumigée permet également de dégager une MCV moyenne élevée de +11,5 %. Considérant les bienfaits mesurés avec cette régie sur la santé des sols, susceptibles de se traduire à moyen terme en de meilleurs rendements, cette régie présente une option intéressante. Cela d'autant plus qu'entre 2021 et 2022, le prix des engrais chimiques a augmenté de façon substantielle, alors que l'engrais organique de type Acti-Sol est demeuré stable dans le temps (2021 : 448 \$ t⁻¹; 2022 : 432 \$ t⁻¹). Ainsi, le coût à l'hectare de la régie fertilisante conventionnelle (Producteur 100 % minérale) a augmenté de 36 % en contexte non fumigé et de 22 % en contexte fumigé. En comparaison, le coût des régies intégrant une part d'engrais organique dans leur formulation a seulement augmenté de 22 % et 15 % en moyenne, selon qu'il y ait eu absence ou présence de fumigation au champ, respectivement. Les fientes granulées de poules ont donc l'avantage de stabiliser les coûts dans le temps lorsque les prix des engrais chimiques granulaires ou solubles fluctuent.

Tableau 16. Variation de la marge sur coûts variables des diverses régies nutritives, en comparaison de la régie Producteur non fumigée, saisons 2021 et 2022.

Régies testées		2021	2022	Moyenne 2021-2022
Producteur		---	---	---
~ 40 % N _{org}	NF	- 14 %	- 1 %	- 7,5 %
~ 70 % N _{org}		- 7 %	+ 1 %	- 3 %
100 % N _{org}		- 20 %	- 3 %	- 11,5 %
Producteur		+18 %	+17 %	+ 17,5 %
~ 40 % N _{org}	F	+10 %	+1%	+ 5,5 %
~ 70 % N_{org}		+7 %	+16 %	+ 11,5 %
100 % N _{org}		+2 %	+13 %	+ 8,5 %

¹ Fumigés : F. Non fumigés : NF.

1 CONCLUSION

Un projet de 2 saisons (2021 et 2022) a été réalisé en contexte de production commerciale à Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans. Celui-ci visait à étudier l'effet des apports d'engrais organiques riches en carbone (C) labile (Acti-Sol 5-3-2) 1) comme fertilisant azoté, de même que 2) sur l'activation des populations microbiennes des sols, en présence ou en absence de la fumigation. Il est en effet posé comme hypothèse que le C labile pourrait soit 1) activer les populations bénéfiques du sol dans les sols non fumigés où elles feraient compétition aux agents pathogènes ou 2) réactiver plus rapidement les populations bénéfiques dans les sols fumigés. Les essais ont ainsi été implantés dans des champs reconnus pour avoir une productivité faible à modérée, où les gains sur la santé des sols par la modification des pratiques de culturales avaient davantage le potentiel d'être observés. Cinq régies nutritives combinant différentes proportions d'apport de N minéral et organique (N_{org}) au buttage (ON, 100 % N minéral [régie Producteur]), $\sim 40\% N_{org}$, $\sim 70\% N_{org}$, $\sim 100\% N_{org}$), complémentés d'engrais solubles (NPK ou PK seulement) fertigués, étaient comparées.

Les deux années, la fumigation a eu un impact majeur sur toutes les variables végétales suivies, tandis que l'impact de la fertilisation a été plus modéré, surtout lors de la 2^e saison, alors que le site a présenté peu de réponse aux apports de N. Ainsi, les plants des sols fumigés ont produit, indépendamment de la fertilisation, une biomasse de plant et des rendements en fruits commercialisables plus élevés, jusqu'à 20 %. Les plants des sols fumigés avaient aussi un périmètre du collet plus grand et un calibre moyen des fruits supérieur à ceux des régies non-fumigées. Cependant, il demeure que les régies avec apport de N_{org} n'ont pas produit des plants plus petits que la régie Producteur. De plus, en 2022, dans les sols non fumigés, la fertilisation apportant $\sim 70\% N_{org}$ a permis le seul développement de plants plus élevé que celui des plants de la régie témoin ON. La régie $\sim 70\% N_{org}$ est aussi la seule ayant permis les deux saisons de produire des rendements égaux à la régie Producteur, avec des fruits du même calibre moyen, tant dans les sols fumigés que non traités.

En ce qui a trait aux variables de sol, tant la fumigation que la fertilisation ont eu des effets, ceux de la fumigation demeurant les plus marqués. Ainsi, à tous moments, le potentiel d'activité biologique (taux respiratoire) est apparu réduit dans les sols fumigés. Cependant, en 2021, au pic de production, les régies mixtes ~ 40 et $\sim 70\%$ de N_{org} ont permis de doubler l'activité biologique, en comparaison de la régie Producteur présentant le taux le plus faible de tous. Les sols fumigés avaient aussi les contenus en N labile les plus élevés aux stades cibles de nutrition et de pic de production. Cependant, sans égard à la fumigation, les contenus en N labile formaient à presque tous les moments de mesure un gradient allant de plus élevé dans les sols avec apport de C labile, suivi du sol de la régie Producteur, puis du sol Témoin ON. Cependant, le gain le plus intéressant au regard de la santé des sols a été mesuré sur la cote partielle de santé (basée sur les paramètres biologiques). En effet, à chaque année, suivant une seule année d'apport de C labile, la régie $\sim 70\% N_{org}$ a permis au stade cible de nutrition des fraisiers de hausser la cote de santé.

Enfin, en termes économique, dans le contexte étudié de sol avec une cote de santé inférieure et une incidence de maladie élevée, la fumigation a permis un gain de revenus important dans toutes les régies de fertilisation, en comparaison de la régie Producteur non-fumigée. Ainsi, malgré un coût plus élevé, la marge sur coût variable (MCV) est plus grande pour toutes les régies fumigées. Cependant, parmi les régies fumigées, l'apport de $\sim 70\% N_{org}$ a tout de même dégager la 2^e MCV moyenne la plus élevée. À ceci s'ajoute qu'entre 2021 et 2022, le prix des engrais minéraux a augmenté de façon substantielle, alors que celui de l'engrais organique est demeuré stable. Ainsi, alors que le coût à l'hectare de la régie Producteur-fumigée a augmenté de 22 %, celui des régies avec une part de N_{org} a seulement augmenté de 15 % en moyenne, présentant ainsi l'avantage de stabiliser les coûts dans le temps lorsque les prix des engrais minéraux granulaires ou solubles fluctuent. Considérant les bienfaits mesurés avec la régie mixte $\sim 70\% N_{org}$ sur la santé des sols après seulement une application, susceptibles de se traduire à moyens termes en de meilleurs rendements, celle-ci présente au final une option intéressante.

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.

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.

Deschênes, P., Boivin, c., Vallée, J. 2021. Vitrine technologique sur les outils d'aide à la décision pour la régie de l'eau en contextes agricoles variés. Rapport final. 124 p.

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

Gauthier, M., M. Champagne. 2017. Évaluation de la santé globale des sols – Interprétation des résultats associés à l'état de santé globale des composantes physiques, biologiques et chimiques des sols agricoles. 17 p.

[En ligne] https://www.agro-enviro-lab.com/sante-sols/description_indicateur_sante_sols

Garcia, C., Hernandez, T. et Costa, F. 1991. Study on water extract of sewage sludge compost. Soil Sci. Plant Nutr. 37(3) : 399-408.

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.

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.

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

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

2 ANNEXES

ANNEXE 1 - TABLEAUX DES APPORTS DE NUTRIMENTS

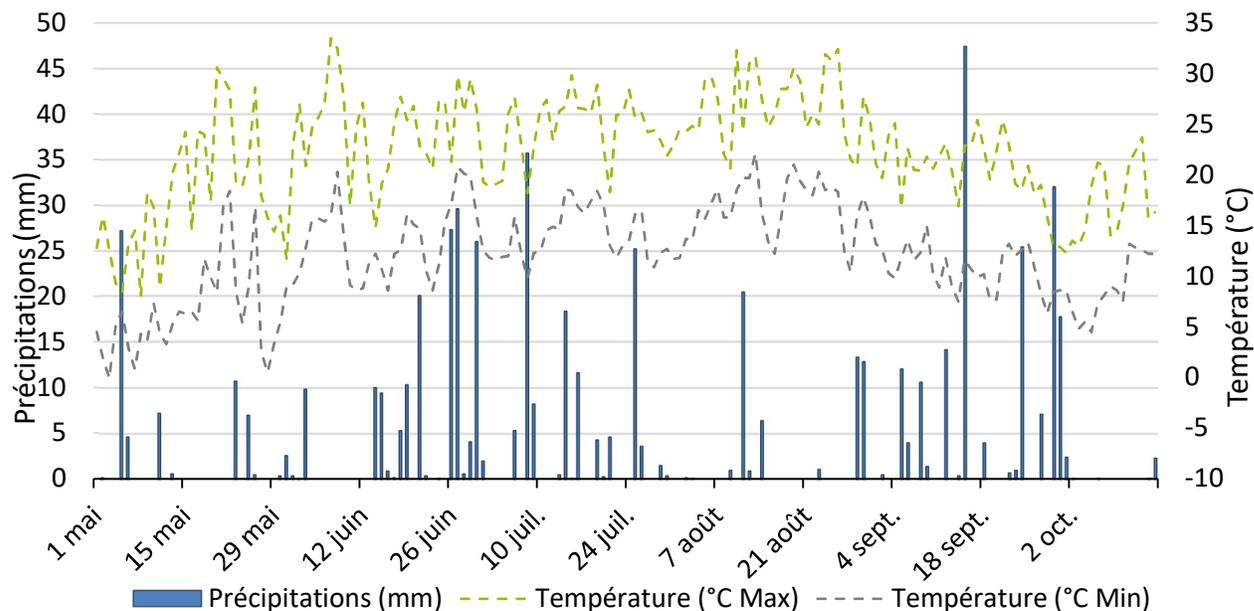
Apports en N_{eff} , P_2O_5 , K_2O et C_{org} total selon les diverses régies de fertilisation testées, 2021.

Traitement	Type d'apport	N_{eff} (kg ha ⁻¹)	P_2O_5 (kg ha ⁻¹)	K_2O (kg ha ⁻¹)	C_{org} total (kg ha ⁻¹)
Témoïn ON (T1/T6)	Minéral au buttage	0	26	30	0
	Fertigation	0	23	76	0
	Total	0	50	106	0
Producteur (T2/T7)	Minéral au buttage	46	26	30	0
	Fertigation	44	23	77	0
	Total	90	50	107	0
~ 40 % org (T3/T8)	Minéral au buttage	46	26	30	0
	Acti-Sol au buttage	30	21	14	54
	Fertigation	15	8	60	0
	Total	91	55	104	54
~ 70 % org (T4/T9)	Minéral au buttage	30	18	20	0
	Acti-Sol au buttage	60	42	28	109
	Fertigation	0	0	56	0
	Total	90	60	104	109
100 % org (T5/T10)	Acti-Sol au buttage	90	64	42	0
	Fertigation	0	0	56	163
	Total	90	64	98	163

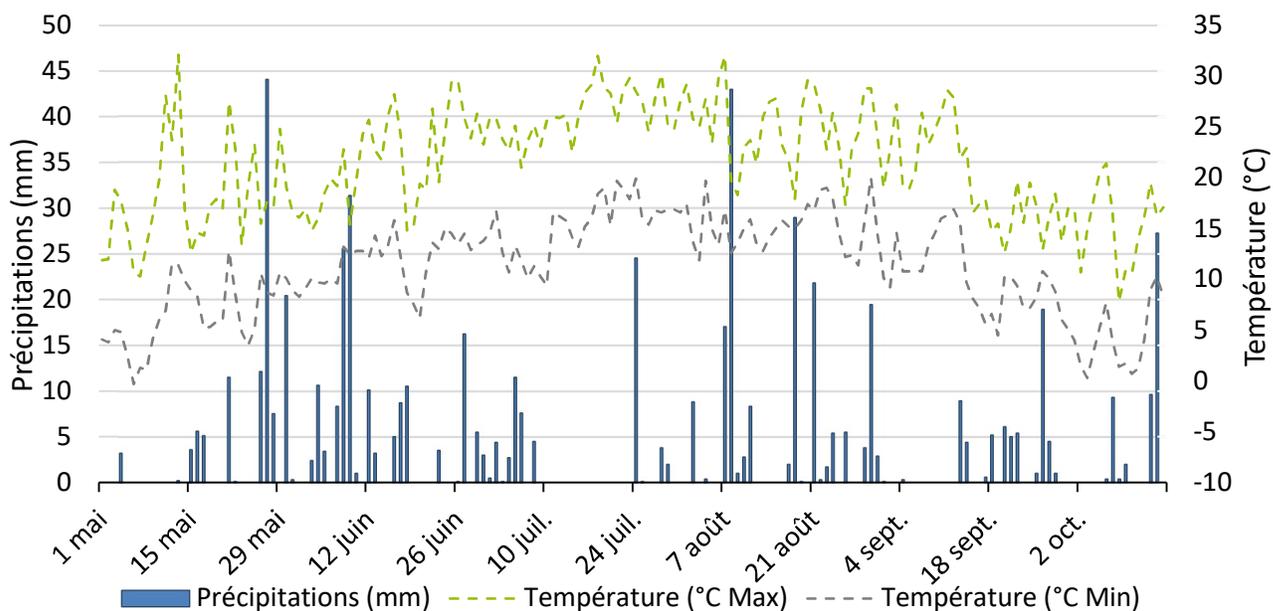
Apports totaux en N_{efficace} , P_2O_5 , K_2O et $C_{\text{organique}}$ total selon les diverses régies de fertilisation testées, 2022.

Traitement	Type d'apport	N (kg ha ⁻¹)	P_2O_5 (kg ha ⁻¹)	K_2O (kg ha ⁻¹)	C_{org} total (kg ha ⁻¹)
Témoïn ON (T1/T6)	Minéral au buttage	0	26	30	0
	Fertigation	0	62	41	0
	Total	0	89	71	0
Producteur (T2/T7)	Minéral au buttage	46	26	30	0
	Fertigation	57	50	33	0
	Total	103	76	63	0
~ 40 % org (T3/T8)	Minéral au buttage	46	26	30	0
	Acti-Sol au buttage	39	30	20	41
	Fertigation	15	0	10	0
	Total	100	56	60	41
~ 70 % org (T4/T9)	Minéral au buttage	30	17	20	0
	Acti-Sol au buttage	73	56	37	76
	Fertigation	0	0	0	0
	Total	103	73	57	76
100 % org (T5/T10)	Acti-Sol au buttage	95	73	49	0
	Fertigation	0	0	0	100
	Total	95	73	49	100

ANNEXE 2 – DONNÉES CLIMATIQUES



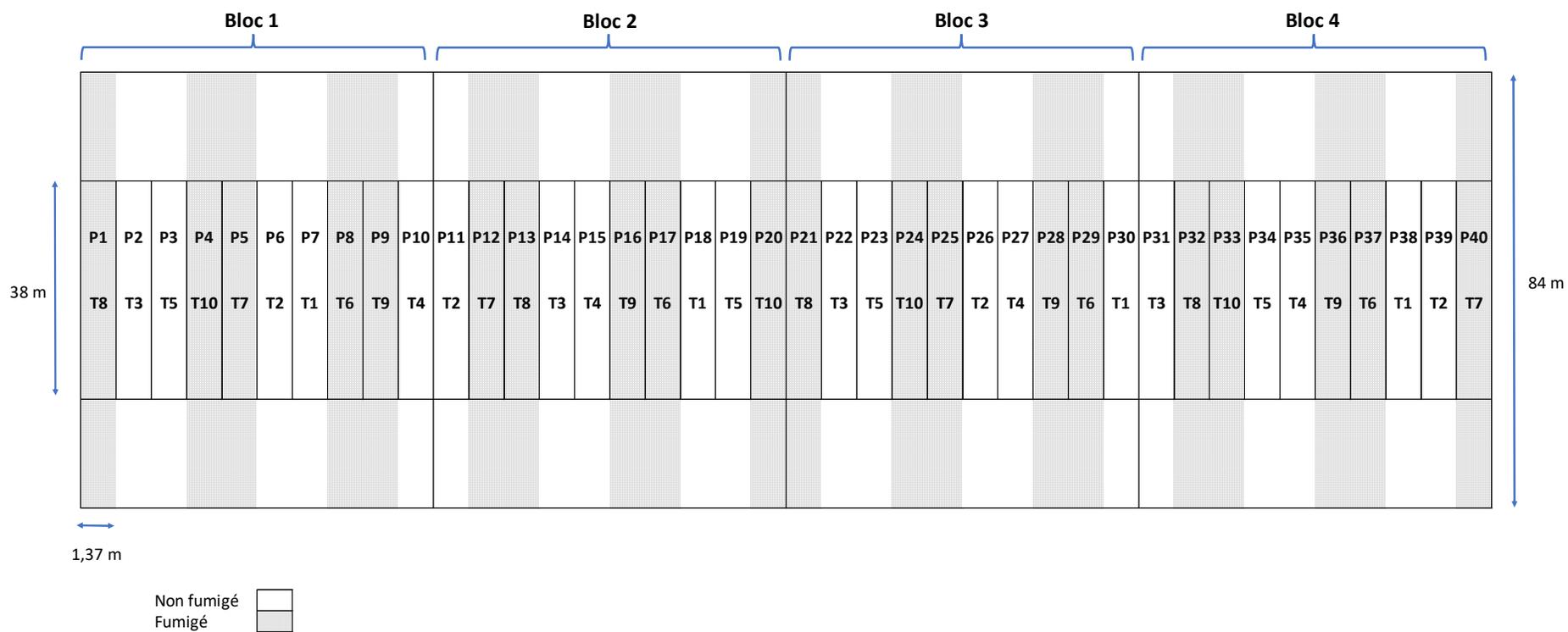
Données climatiques (température de l'air et précipitations) de la station météorologique de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans, 2021.



Données climatiques (température de l'air et précipitations) de la station météorologique de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans, 2022.

ANNEXE 3 – DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

Dispositif 2021



Dispositif

