



Rapport final – IA 119038

Développement de stratégies de fertilisation dans l'ail biologique combinant des engrais verts et de ferme basées sur leur dynamique de fourniture en N et P et leur impact sur la qualité des sols.

Durée du projet : 04-2019 / 05-2023

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

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



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

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

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

Question ou commentaire

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

Auteurs du rapport

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

Équipe de réalisation

Christine Landry, Ph. D., biol., agr., IRDA
Mylène Marchand-Roy, M. Sc., IRDA
Julie Mainguy, B. Sc., IRDA
Aurélie Demers, B. Sc., IRDA
Maude Langelier, M. Sc., IRDA

François Gendron, biol., Club
agroenvironnemental de l'Estrie
Maggie Bolduc, agr., Club
agroenvironnemental de l'Estrie

Collaborateurs

Sébastien Grandmont, producteur d'ail
biologique, Ferme Le Petit Mas
Marie-Pierre Dubeau, productrice d'ail
biologique, Ferme Le Petit Mas
Geneviève Legault, agr., DRE MAPAQ
Jonathan Roy, agr., DRCA MAPAQ
Anne Weil, agr. Ph. D., CETAB+

Merci à notre partenaire financier

Ce projet de recherche a été financé par l'entremise du programme Innov'Action Agroalimentaire, en vertu du Partenariat canadien pour l'agriculture, entente conclue entre les gouvernements du Canada et du Québec.

PARTENARIAT
CANADIEN pour
l'AGRICULTURE

Canada Québec

Ce rapport peut être cité comme suit :

Landry, C., Mainguy, J., Marchand-Roy, M., Demers, A et Forest-Drolet J. 2024. Développement de stratégies de fertilisation dans l'ail biologique combinant des engrais verts et de ferme basées sur leur dynamique de fourniture en N et P et leur impact sur la qualité des sols. Rapport final IA 119038. IRDA et partenaires. 56 pages.

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

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement les producteurs de la Ferme le Petit Mas où les essais ont été tenus. Les remerciements s'adressent également au personnel du Laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA ainsi qu'aux auxiliaires de recherche de l'IRDA qui ont permis de contribuer au franc succès du projet.

TABLE DES MATIÈRES

1	Résumé.....	3
2	Description du projet	4
2.1	mise en contexte	4
2.2	objectifs.....	6
3	Matériel et méthode	6
3.1	Sites d'essais	6
3.2	Traitements	7
3.3	Mise en place de l'expérience	8
3.4	Dispositif expérimental et analyses statistiques	11
3.5	COLLECTE DE DONNÉES	12
3.5.1	Caractérisation des EV et EF	12
3.5.2	Analyses physiques, chimiques et biologiques du sol	13
3.5.3	Suivi de la température du sol et données météorologiques	15
3.5.4	Suivi <i>in situ</i> et analyses chimiques des MEI.....	15
3.5.5	Développement et nutrition des plants et rendements	16
3.5.6	Évaluation post-entreposage.....	17
3.6	Analyse économique	17
4	Résultats et discussion	18
4.1	Conditions climatiques et température du sol.....	18
4.1.1	Suivi météorologique	18
4.1.2	Impact du paillage	19
4.2	Caractérisation des contenus en NPK des engrais verts et de ferme et valeur fertilisante	20
4.3	Dynamique du N et P disponible du sol sur le cycle de production.....	24
4.3.1	Période automnale	24
4.3.2	Saison estivale	26
4.4	Développement et nutrition des plants	29
4.4.1	Évolution du développement des plants.....	29
4.4.2	Évolution du prélèvement en éléments majeurs et soufre par les plants	30
4.4.3	Prélèvement totaux et exportations en éléments majeurs et soufre	33
4.4.4	Analyses foliaires	35
4.5	rendements et qualité de la récolte	37
4.5.1	Rendements	37
4.5.2	Qualité	39
4.6	Déclassement, maladies, virus et conservation des bulbes d'ail	41
4.6.1	Déclassement, maladies et virus	41
4.6.2	Conservation	43
4.7	Évolution de la santé des sols	43
4.8	Analyse technico-économique	45
5	Conclusion.....	48
6	Références.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1. Recommandations de fertilisation pour la culture de l'ail en Amérique du Nord.....	4
Tableau 2. Caractéristiques physico-chimiques du sol avant le semis d'engrais verts, en juin 2019 et 2021.....	7
Tableau 3. Traitements comparés à l'étude.	8
Tableau 4. Principales opérations culturales et prises de mesures pour les deux cycles de production.....	10
Tableau 5. Méthodes d'analyse de laboratoire des variables mesurées sur les végétaux et les engrais organiques.	13
Tableau 6. Méthodes d'analyse de sols du laboratoire de l'IRDA et d'AEL.....	14
Tableau 7. Période de pose-retrait des membranes d'échanges ioniques pour les deux cycles de culture.	16
Tableau 8. Contenus en éléments nutritifs des engrais verts des cycles 1 et 2 d'essais.	20
Tableau 9. Caractérisation physicochimique des engrais de ferme des cycles 1 et 2 d'essais.	21
Tableau 10. Bilan des apports en N total et efficace de chacune des régies testées, cycle 1 (2019-2020).	21
Tableau 11. Bilan des apports en N total et efficace de chacune des régies testées, cycle 2 (2021-2022).	21
Tableau 12. Bilan des apports de P total exprimés sous forme de P ₂ O ₅ de chacune des régies testées, cycle 1 (2019-2020).	22
Tableau 13. Bilan des apports de P total exprimés sous forme de P ₂ O ₅ de chacune des régies testées, cycle 2 (2021-2022).	22
Tableau 14. Bilan des apports de K total exprimés sous forme de K ₂ O de chacune des régies testées, cycle 1 (2019-2020).	22
Tableau 15. Bilan des apports de K total exprimés sous forme de K ₂ O de chacune des régies testées, cycle 2(2021-2022).	23
Tableau 16. Teneurs et apports en soufre des engrais verts et de ferme, saisons 2022.	23
Tableau 17. Bilan des apports de S total exprimés sous forme de SO ₃ de chacune des régies testées, cycle 2 (2021-2022).	24
Tableau 18. Contenus en N et P disponible et potentiel de minéralisation du N organique des sols (0-20 cm) selon les régies testées, en automne 2019 et 2021.....	26
Tableau 19. Prélèvements ¹ totaux en éléments majeurs et soufre, pour les régies ayant obtenu les meilleurs rendements vendables, 2020 et 2022.	34
Tableau 20. Exportations en éléments majeurs et en soufre, selon les meilleurs rendements vendables, 2020 et 2022. ...	34
Tableau 21. Recommandations d'apport pour l'ail de la grille de référence en fertilisation du Québec des alliées.....	35
Tableau 22. Analyses foliaires au stade pré-bulbaison des plants d'ail, 2022 ¹	36
Tableau 27. Valeurs de P des effets principaux de l'essai pour les deux cycles de production (2019-2020 ou 2021-2022) sur les indicateurs d'activité microbienne du sol au stade bulbaison.....	44
Tableau 28. Coûts de production ¹ reliés aux traitements (\$ ha ⁻¹), pour les cycles de production 2019-2020 et 2021-2022.	46
Tableau 29. Revenus pour un calibre moyen et par calibre (petit, moyen et gros) et gains potentiels par rapport à la régie sans paille, sans EV et sans EF pour les deux cycles de production.....	47

Liste des figures

Figure 1. Site d'essai du 2e cycle, Ferme le Petit Mas, 3 mai 2022.....	7
Figure 2. Engrais vert d'avoine-pois avant l'enfouissement (gauche : Site 2 en 2021) et EV fauché avant son incorporation (à droite : Site 1 en 2019).	9
Figure 3. Vue de l'application des FGP au printemps. À gauche : sillon et application de FGP dans une parcelle avec paille. À droite : sillon et application de sulfate de K dans une parcelle sans paille.	10
Figure 4. Dispositif expérimental établi à la Ferme le Petit Mas pour les deux cycles d'essais.....	12
Figure 5. Sonde de température HOBO installée légèrement sous le caïeu.....	15
Figure 6. Pose de la membrane d'échange ionique à proximité des plants pour le suivi <i>in situ</i> du N et du P.....	16

Figure 7. Données climatiques au site d'essai pour la saison 2020, enregistrées sur le site d'essai sauf pour les données du 15 avril au 12 mai qui proviennent de la station météo de St-Malo d'Auckland (Latitude: 45.2; Longitude: -71.5).....	18
Figure 8. Données climatiques au site d'essai pour la saison 2022, enregistrées sur le site d'essai sauf pour les données du 15 au 25 avril qui proviennent de la station météo de St-Malo d'Auckland (Latitude: 45.2; Longitude: -71.5).	19
Figure 9. Suivi de la température du sol sous le paillis sur l'ensemble des mois de production des 1 ^{er} et 2 ^e cycle d'essais.....	19
Figure 10. Flux d'ion nitrate dans la couche utile de sol (0-20 cm) en automne 2019 et 2021, à partir de l'application du fumier de broiler et de la plantation des caïeux jusqu'aux premiers gels.....	25
Figure 11. Flux d'ion phosphate dans la couche utile de sol (0 -20 cm) en automne 2019 et 2021, à partir de l'application du fumier de <i>broiler</i> et de la plantation des caïeux jusqu'aux premiers gels.	26
Figure 12. Flux d'ion nitrate dans la couche utile de sol (0-20 cm) selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022.	28
Figure 13. Flux d'ion phosphate dans la couche utile de sol (0-20 cm) selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022.	28
Figure 14. Progression des masses de plants selon les diverses régies testées, été 2020.	29
Figure 15. Progression des masses de plants selon les diverses régies testées, été 2022.	30
Figure 16. Progression des prélèvements en azote par plant selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022.....	31
Figure 17. Progression des prélèvements en phosphore par plant selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022.	32
Figure 18. Progression des prélèvements en potassium par plant selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022.....	32
Figure 19. Progression des prélèvements en soufre par plant selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022.	33
Figure 20. Relation entre la teneur foliaire en azote des plants d'ail au stade pré-bulbaison et le rendement vendable, saisons 2020 et 2022.....	36
Figure 21. Relation entre la teneur foliaire en azote des plants d'ail (partie aérienne) au stade bulbaison et le rendement vendable, saisons 2021 et 2022.	37
Figure 22. Rendements vendables en bulbes produits selon les diverses régies testées en proportion du meilleur rendement atteint, été 2020.	38
Figure 23. Rendements vendables en bulbes produits selon les diverses régies testées en proportion du meilleur rendement atteint, été 2022.	39
Figure 24. Proportion des calibres des rendements vendables selon les diverses régies testées, récoltes 2020 et 2022.	40
Figure 25. Nombre de caïeux par bulbe et poids moyen des caïeux selon les diverses régies testées, récoltes 2020 et 2022. ...	40
Figure 26. Concentration en soufre des caïeux selon les diverses régies testées, saisons 2020 et 2022.....	41
Figure 27. Proportion de bulbes déclassés selon les diverses régies testées, récoltes 2020 et 2022.	42
Figure 28. Photos de bulbes déclassés, saison 2022.	42
Figure 29. Nitrate résiduel et potentiel de production de nitrate par minéralisation post-récolte, selon les diverses régies testées, 2020 et 2022.	44

1 RÉSUMÉ

Il y a un grand intérêt pour la production d'ail biologique (bio) au Québec. Toutefois, la fertilisation azotée (N) comporte d'importants défis supplémentaires à celle de l'ail conventionnel. Elle augmente les coûts et ajoute des contraintes d'application, ce qui peut entraîner des pertes et de la variabilité au niveau des rendements. L'acquisition de connaissances sur la dynamique de fourniture en N de régies mixtes d'engrais verts (EV) et de ferme (EF), selon la présence ou non de paille, et sur leur impact sur la nutrition et le rendement de l'ail, permettrait toutefois de mettre au point des stratégies de fertilisation qui assureraient de combler les besoins en N de l'ail tout en minimisant l'accumulation de P et le lessivage de N. Une étude a donc été réalisée en contexte de production commerciale d'ail biologique à la ferme Le Petit Mas en Estrie avec la variété d'ail *Music*. Elle s'est échelonnée sur deux cycles complets de production, soit 2019-2020 et 2021-2022. Différentes doses de fertilisation azotée, incluant la dose référence actuelle et une dose réduite des apports estimés des EV, ont été testées, en comparaison de régies témoins sans fertilisation. L'impact de la paille sur la fertilité du sol, la nutrition et le rendement de la culture a aussi été suivi. L'EV était un mélange d'avoine (C/N plus élevé; 20-25) et de pois (C/N plus bas; 8-9). Les EF appliqués ont été les fientes granulées de poules (FGP), instables et facilement minéralisables, et le fumier de poulets à griller (fumier de « broiler » (FB)) davantage résistant à la minéralisation du fait de son contenu en litière. Au total, huit stratégies de fertilisation, dont 4 exemptes de paille et 4 sous régie paillée, ont été implantées et répétées 4 fois pour un total de 32 unités expérimentales. Au champ, la dynamique *in situ* des ions NO_3 et PO_4 a été suivie (de la plantation à la récolte) à l'aide de membranes d'échange ionique. De même, la fertilité des sols (chimique et biologique) a été mesurée par des mesures ponctuelles d'extraction de sol en laboratoire. Le développement et le prélèvement en N-P-K et S (second cycle) des plants à divers stades ont aussi été mesurés. Suivant la récolte, les rendements vendables (poids et calibre), la qualité des bulbes et caïeux (maladies, taux de soufre) et la conservation des bulbes ont été déterminés et une analyse coûts-revenus a été réalisée. La santé des sols fut également évaluée selon des paramètres reconnus, de même que le nitrate résiduel. L'étude a permis d'obtenir plusieurs résultats intéressants, entre autres celui de bien départager l'effet de la présence de paille vs l'effet de la fertilisation N, tant sur les rendements que sur la qualité de l'ail, de même que sur la dynamique des ions nitrates et phosphate au sol. Au final, elle a permis d'identifier les meilleures régies.

2 DESCRIPTION DU PROJET

2.1 MISE EN CONTEXTE

Au Québec, la production d’ail est en plein essor. On y retrouve 267 producteurs, 190 ha en production et une association proactive (Producteurs Ail Québec) comportant 149 membres (la Terre de chez nous, 2018). Seulement pour l’année 2023, les producteurs du Québec ont vendu pour 8 M\$ des 22,9 M\$ de ventes d’ail au Canada, seulement devancés par l’Ontario (9,9 M\$) et suivi de loin par la Colombie-Britannique (3,5 M\$) (Statistique Canada, 2024). La demande est ainsi forte pour l’ail du Québec, incluant l’ail biologique (bio), très prisé des consommateurs. En 2021, 103 entreprises cultivaient d’ailleurs 110 ha sous régie bio (Portail Bio Québec, 2022). Malgré cela, la demande dépasse largement l’offre dans tout le pays (Association pour le commerce des produits biologiques, 2017). Seulement 10 % de l’ail consommé au Québec est en fait produit dans la province (la Terre de chez nous, 2018). Avec son prix de vente de 22 à 26 \$ kilo⁻¹, très supérieur à celui de l’ail importé, le marché est à conquérir et peut rapporter des recettes substantielles (Portail Bio Québec, 2022). D’ailleurs, selon un sondage réalisé auprès de 114 producteurs québécois, 75 % voulaient augmenter leur production dans les 3 années suivantes (Lyne Desnoyers, 2018). Pour soutenir cette expansion, il est toutefois prioritaire d’améliorer les connaissances sur la fertilisation de cette culture, tant en termes de besoins, que de pratiques. La fertilisation de l’ail présente en effet plusieurs défis. En plus de ne pas faire l’objet d’une grille spécifique de fertilisation, sa plantation automnale, suivie d’un paillage, complexifie grandement la gestion de la fertilisation, surtout en agriculture bio. Selon la liste des priorités de R&D de ce secteur de production (CRAAQ, 2022), il ressortait comme primordial d’augmenter les connaissances sur les apports de fertilisants (ex. caractéristiques des produits, dynamique de minéralisation), tant les engrais de ferme que les engrais verts (EV). De même qu’évaluer les bénéfices agronomiques à moyen terme d’adoption de techniques, telles que l’inclusion d’EV dans la rotation, sur la qualité des sols.

Du point de vue des besoins en N, selon la grille actuelle du guide de référence en fertilisation (GREF) du Québec (CRAAQ, 2010), l’ail serait une culture exigeante en azote (N), avec une recommandation de 110 kg N ha⁻¹. Toutefois, puisque cette grille jumelle des cultures qui présentent des différences importantes (oignon et poireau), dont celle d’être plantée au printemps, un doute raisonnable existe quant à son exactitude. À cet effet, une consultation des diverses grilles qui prévalent en Amérique du Nord renforce ce doute puisque la dose recommandée y varie grandement, passant de 28 à 140 kg N ha⁻¹, selon les régions concernées (Tableau 1) (CRAAQ, 2020). De même, au Québec, des essais récents de fertilisation de l’ail bio (Couture et coll., 2019) ont indiqué que les besoins en N seraient inférieurs, aux alentours de 60 kg N ha⁻¹, avec une réponse de la culture à la fertilisation azotée (cultivar *Music*, régie biologique) que 4 fois sur 10.

Tableau 1. Recommandations de fertilisation pour la culture de l’ail en Amérique du Nord.

États ou Provinces	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Références
	----- kg/ha -----			
Ontario	110	0-180	0-230	OMAFRA, 2011
New-York (Northwest)	28-56	0-224	0-224	Stewart, 2020
Michigan	118	168	112	Goldy et coll., 2000
Mid-Atlantic ¹	140	168	168	Wyenandt et coll., 2020
Mid-West	78-140	28-280	0-280	Egel, 2018
Pennsylvanie	140	168	168	Ford et coll., 2014
Minnesota	56-134	0-168	0-224	Rosen et Eliason, 2005

¹ Delaware, Maryland, New Jersey, Pennsylvania, Virginia, West Virginia.

[Tiré du Guide de production – Ail [CRAAQ 2020], Chapitre 3 (Landry et coll.)]

La synchronisation des apports de fertilisants comporte également son lot de défis. Il faut éviter les apports trop importants de N en automne, afin de ne pas nuire à la survie à l'hiver, mais produire rapidement du N disponible en quantité suffisante au printemps, car le cycle de production de l'ail est court (récolte mi-juillet à la mi-août) et les besoins estimés relativement élevés. Ainsi, les fumiers et compost de fumier, de minéralisation plus lente dont l'application est sécuritaire en automne ne relâchent pas rapidement et en quantité du nitrate au printemps suivant (Landry et coll., 2018), tandis que les engrais de ferme (EF) à minéralisation rapide sont à risque de provoquer un relâchement trop élevé et hâtif de nitrate avant l'hiver, avec un relâchement complémentaire insuffisant au printemps suivant. L'application de ces derniers pourrait se faire au printemps, mais il faudrait alors retirer la paille ou s'abstenir d'en appliquer en automne. De plus, un écart de 120 jours doit être respecté entre l'épandage d'EF et la récolte des cultures destinées à la consommation humaine dont la partie comestible est en contact avec le sol. Cette contrainte réduit le choix d'intrants pouvant être utilisés au printemps, ne laissant que des produits plus coûteux (farine de sang, émulsions de poisson, FGP).

Par ailleurs, les EV peuvent être utilisés en complément des EF. Ceux qui s'établissent rapidement présentent en plus l'avantage de compétitionner les mauvaises herbes, en plus de contrer l'érosion des sols. Mais la valeur fertilisante en N des EV enfouis avant plantation reste à définir tant en termes de quantité de N que de vitesse de minéralisation. Leur enfouissement étant en début/mi-août, ceux-ci pourraient se minéraliser dans les nombreux mois restant avant les premiers gels vu la nature fermentescible de leurs tissus. À cet effet, pour cette période, un mélange avoine-pois pourrait s'avérer un choix pertinent. L'EV d'avoine présente l'avantage d'un ratio C/N plus élevé qu'une légumineuse, entre 20-25, ainsi qu'une forte biomasse après seulement 2 mois de croissance (Landry et coll., 2020). Des essais ont aussi révélé qu'il apporte beaucoup de potassium en comparaison des légumineuses (Landry et coll., 2016), élément pour lequel l'ail est exigeant. L'EV de pois pousse également vite et est particulièrement bien adapté aux conditions froides (Weill et coll., 2009). Il a un C/N beaucoup plus bas, entre 8 et 9 et une forte teneur en N. Plusieurs essais en champ au Québec ont démontré sa supériorité à fournir du N à la culture suivante lorsque cultivé à la dérobee et enfoui juste avant les gelées (Verville, 2014, Groupe Envir-Eau-Sol, 2012, Landry et coll., 2018). Ainsi, l'usage d'un mélange avoine-pois pourrait permettre de fournir du N en quantité appréciable, tout en évitant que la minéralisation du pois ne se déroule trop rapidement. Dans la même logique, le fumier de volaille de type « *broiler* » (FB) avec ripe pourrait se révéler intéressant. En effet, le fumier de poulet est riche en N labile, mais la présence de ripe, constituée de C très récalcitrant et qui hausse le C/N, vient ralentir sa minéralisation à court terme. Ainsi, dans une étude menée sur le maïs-grain bio en Montérégie, du FB appliqué en automne a eu un fort pic de libération de N tôt au printemps suivant, comparativement aux fumiers et compost de fumier de bovin, tandis que la libération d'N de celui mis au printemps s'est avéré trop tardive (Landry et coll., 2018).

À l'opposé, pour le printemps, les FGP très riches en carbone labile facilement minéralisable et en N rapidement disponible s'avèrent un choix prometteur. Faciles d'utilisation et dotées d'une efficacité fertilisante constante et élevée, les FGP font l'objet d'un fort engouement dans la fertilisation des cultures bio. Des essais en champ ont démontré que le relâchement du N pouvait débiter dès 24 heures après leur application, avec une intensité équivalente aux engrais de synthèse (Landry et coll., 2018 et Landry et coll. 2019). Un récent projet, visant l'optimisation de la fertilisation de l'ail bio, a d'ailleurs permis de tester l'apport de FGP au printemps en doses croissantes (0 à 120 kg N ha⁻¹). Selon ces essais, l'application de 60 kg de N ha⁻¹ de FGP au stade 2-3 feuilles semble être la meilleure régie (Roy, J. et coll., 2019). Les FGP ont toutefois la réputation d'être plus arides pour le sol lorsqu'utilisées à répétition, n'apportant que très peu de matière organique stable, structurante pour les sols, d'où l'intérêt de les jumeler avec des EV. L'EV pourrait aussi contribuer à soutenir la production en automne puisqu'aucun EF n'est apporté. Le paillage complique cependant la fertilisation printanière puisque les granules se retrouvent alors à demeurer en surface de celle-ci pour un temps méconnu, à moins de tasser la paille et de les appliquer directement au sol. Cela dit, en raison du coût élevé de la paille, un nombre de plus en plus significatif de producteurs ne paillent pas si la protection hivernale n'est pas indispensable. Par exemple, en Chaudière-Appalaches, la paille est peu

utilisée, tandis qu'en Estrie, c'est une pratique bien établie. Par contre, la paille joue également un rôle sur la préservation de la qualité des sols et la lutte aux adventices. Il était donc important de réaliser des essais qui couvrent cette région en plus de celle sans paille afin de rejoindre un maximum de producteurs.

Au final, ce projet vise donc à tester des régies exploitant des EV et EF présentant des caractéristiques intéressantes au regard du cycle de production de l'ail et des techniques de production. En parallèle, l'acquisition de données québécoises sur la dynamique des nutriments dans le sol sur tout l'automne et la saison de production, ainsi que sur les prélèvements de la culture à divers stades est donc plus que souhaitable pour améliorer l'efficacité technico-économique des entreprises d'ici et diminuer les risques environnementaux de pertes de nitrate dans l'environnement.

2.2 OBJECTIFS

Ce projet vise globalement à développer une stratégie de fertilisation optimale intégrant des EV et des EF qui comble les besoins en P de l'ail à l'automne et ceux en N et K au printemps suivant.

Plus spécifiquement, ce projet a été conçu pour:

- Caractériser les contenus en N, P et K des EV et des EF afin d'estimer leur valeur fertilisante en éléments disponibles.
- Déterminer la dynamique du N et du P du sol en continu, de l'application des EF à la récolte de l'ail.
- Mesurer l'évolution des prélèvements par les plants et les besoins totaux en N, P et K.
- Évaluer la quantité et la qualité des bulbes, ainsi que le taux de maladie et de conservation des bulbes.
- Mesurer l'évolution de la santé des sols selon le type de régie testée.
- Comparer les marges sur coûts variables des différentes régies.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 SITES D'ESSAIS

Le projet s'est déroulé en contexte de production commerciale, chez l'une des plus grandes entreprises en production d'ail bio au Québec, la Ferme le Petit Mas située à Martinville en Estrie. L'essai y a été répété pendant deux cycles complets de production de l'ail (Figure 1), dans deux champs différents (Site 1 en 2019-2020 et Site 2 en 2021-2022) pour éviter l'effet résiduel des EV et EF. Lors des deux cycles, le dispositif a été implanté à la suite d'un retour de seigle d'automne, sur des sols de type loameux dont les caractéristiques physico-chimiques de la couche de surface (0-20 cm) sont présentées au Tableau 2.



Figure 1. Site d'essai du 2e cycle, Ferme le Petit Mas, 3 mai 2022. Les parcelles sans paille se distinguent de celles avec paillage.

Tableau 2. Caractéristiques physico-chimiques du sol avant le semis d'engrais verts, en juin 2019 et 2021.

Paramètres	Site 1 - 2019	Site 2 - 2021
pH _{eau}	6,29	6,68
Matière organique (M.O.) (%)	5,85	4,44
Texture	Loam	Loam à loam limoneux
Densité apparente (0-20 cm) (g cm ³⁻¹)	0,97	1,25
Agrégats (diamètre moyen pondéré DMP) (mm)	3,12	2,22
Éléments majeurs Mehlich-3 (kg ha⁻¹ b.s.)		
P	128	247
K	284	319
Ca	3400	3428
Mg	148	137
Al (mg kg ⁻¹)	1104	1089
P _{M3} /Al _{M3} (%)	5,22	10,2
Éléments mineurs Mehlich-3 (mg kg⁻¹ b.s.)		
B	0,30	0,35
Cu	4,26	3,76
Fe	175	231
Mn	183	144
Zn	8,03	7,59
Na	4,14	4,77

3.2 TRAITEMENTS

Les engrais verts (EV) et les engrais de ferme (EF) les plus pertinents à tester ont été déterminés avec les producteurs, des conseillers du Club Agroenvironnemental de l'Estrie (CAE), du MAPAQ (Estrie et Chaudière-Appalaches) et une conseillère du CETAB, en considérant le contexte et les problématiques des producteurs d'ail bio ainsi que la disponibilité des fumures. L'EV retenu était un mélange d'avoine et de pois 4010 (Figure 2). Les EF testés étaient quant à eux : 1) le fumier de poulet à griller de type « broiler » (FB), appliqué et incorporé au sol avant la plantation de l'ail et 2) les fientes granulées de poules (FGP) appliquées au printemps au stade 4-5 feuilles dans un sillon près des plants. Ainsi, 8 traitements combinant EV, EF et

présence ou absence de paille (Tableau 3) étaient comparés. L'apport total d'N visé pour les traitements était de 110 kg N efficace (N_{eff}) ha^{-1} à l'exception des traitements témoins (T1, T2, T5, T6) ne recevant soit aucun N (T1-T5), soit aucun EF (T2-T6). L'apport azoté de la matière organique (M.O) a été considéré et soustrait à l'N à apporter (Site 1 : 15 kg N_{eff} ha^{-1} , Site 2 : 0 kg N_{eff} ha^{-1}). Dans les traitements avec EV, l'apport estimé *a priori* du mélange d'avoine-pois était de 50 kg N_{eff} ha^{-1} . Les 60 kg N manquants pour combler le 110 kg N_{eff} ha^{-1} a été apporté avec les EF après leur caractérisation physicochimique et en considérant les CE appropriés (CRAAQ, 2010). Lors de l'enfouissement des EV, la biomasse produite a été mesurée et les tissus caractérisés en laboratoire pour leur teneur en NPK. Le calcul du N_{eff} a ensuite été effectué selon la méthode de Jobin et Douville (1996) dans Duval et coll. (2014). Il s'est alors avéré que leur apport en N_{eff} était inférieur à celui estimé *a priori* (Site 1 : 35 kg N_{eff} ha^{-1} , Site 2 : 30 kg N_{eff} ha^{-1} ; voir Tableau 10 à Tableau 15 – Section 4.2). La dose de N_{eff} testée au global dans les différentes régions était donc plutôt entre 90 et 95 kg N_{eff} ha^{-1} , plutôt que de 110 kg N_{eff} ha^{-1} tel que visé à l'exception de la région sans EV (T8) fertilisée uniquement au moyen d'un EF.

Les besoins en P et K ont été fixés en fonction de l'analyse de sol (Mehlich-3), à chacune des années-site, selon les recommandations du Guide de référence en fertilisation (CRAAQ, 2010). Pour les apports en P, l'ISP dépassant les 4 %, seul un apport minimal (30 kg P_2O_5 ha^{-1}) a été apporté à l'automne afin d'assurer une bonne implantation de la culture d'ail sur recommandation des agronomes impliqués au projet. La poudre d'os a été utilisée pour combler les besoins en P. Seul le traitement apportant du fumier de « broiler » n'a pas reçu de P puisque l'EO couvrait les besoins de la culture. Le K a été comblé par un apport de sulfate de potasse au printemps, en déduisant du besoin total ce qui était apporté par les EF. L'efficacité du P et le K des EV n'étant pas connus, ceux-ci n'ont pas été considérés dans le calcul.

Tableau 3. Traitements comparés à l'étude.

Traitements	Paille	
T1 Sans EV - Sans EF (Témoin ON)		P-OEV-OEF
T2 Avoine-Pois - Sans EF (Témoin EV)	Paille	P-EV-OEF
T3 Avoine-Pois + FB 60 N_{eff}		P-EV-FB
T4 Avoine-Pois + FGP 60 N_{eff}		P-EV-FGP60
T5 Sans EV - Sans EF (Témoin ON)		OP-OEV-OEF
T6 Avoine-Pois sans EF (Témoin EV)	Sans paille	OP-EV-OEF
T7 Avoine-Pois + FGP 60 N_{eff}		OP-EV-FGP60
T8 Sans EV + FGP 110 N_{eff}		P-EV-FGP110

3.3 MISE EN PLACE DE L'EXPÉRIENCE

Les différentes opérations de mise en place du dispositif des deux cycles d'essais, ainsi que leurs dates d'exécution sont présentées dans le

Tableau 4. De façon générale, autour du début de juin, le seigle d'automne présent sur le site d'essai était incorporé dans les 10 premiers cm du sol. Dans les jours suivants, l'engrais vert d'avoine-pois (90 kg ha^{-1} d'avoine et 90 kg ha^{-1} de pois 4010) était semé par le producteur sur toute la superficie de l'essai. Pour produire les bandes sans EV, le producteur repassait détruire la culture quelques jours après la levée de l'EV, et ces sections étaient par la suite hersées à deux reprises afin d'éviter toute repousse d'EV ou de mauvaises herbes. Après 50 de jours de croissance (mi-août), les bandes d'EV étaient fauchées et leurs biomasses incorporées dans les 10 premiers cm de sol en deux passages de machinerie. Environ 3 semaines plus tard (début septembre), l'EF d'automne (FB) était appliqué au sol à la volée dans les parcelles qui en requéraient, de même que la fertilisation phosphatée complémentaire (poudre d'os). Les intrants ont ensuite été incorporés par un léger hersage.



Figure 2. Engrais vert d’avoine-pois avant l’enfouissement (gauche : Site 2 en 2021) et EV fauché avant son incorporation (à droite : Site 1 en 2019).

La plantation des caïeux était réalisée au même moment que les apports d’intrants. Une fois ces derniers incorporés, des lignes ont été tracées mécaniquement dans l’ensemble des parcelles pour faciliter la plantation des caïeux. Pour minimiser au mieux la variabilité du rendement due à la génétique des bulbes mères, les caïeux devant être plantés dans les zones de rendements (planche centrale) (variété *Musica* calibre 5 de 40 à 50 g) ont soigneusement été sélectionnés (caïeux calibrés). Dans un premier temps, des bulbes mères présentant un écart du poids moyen de $\pm 5\%$ ont été retenus. Dans un 2^e temps, ces bulbes ont été décortiqués mécaniquement afin de pouvoir sélectionner parmi tous leurs caïeux ceux de poids similaire ($\pm 7,5\%$). De même, pour assurer une constance entre l’espacement des caïeux sur le rang et diminuer les sources de variation lors de l’évaluation du rendement final et des prélèvements, les caïeux des zones de rendement ont été plantés manuellement et toutes les zones de rendement des divers traitements d’un même bloc ont été plantées par la même personne. Les autres planches situées à gauche et à droite de la planche centrale servant de zones tampons ont été plantées mécaniquement par le producteur avec des caïeux non calibrés. Dans toutes les planches, les caïeux ont été plantés aux 4 pouces (0,1016 m) sur le rang, à une profondeur de 7 cm, à raison de 3 rangs par planche de 1,37 m de large, pour une densité théorique moyenne de près de 160 000 plants ha⁻¹.

Suivant la plantation, des enregistreurs de température ont été installés dans le sol, à 8 endroits dans le dispositif (2 /bloc), dans un traitement prévu avec et un sans paille. Les sondes ont été positionnées légèrement en dessous de la profondeur de plantation des caïeux, soit à 7-10 cm de profondeur. Les sondes sont demeurées en place jusqu’à la récolte en juillet de l’année suivante. À la mi-octobre, le paillis végétal a été appliqué dans les traitements qui en requéraient. La quantité de paille a été mesurée approximativement au volume et appliquée manuellement. Un soin particulier a été pris afin de s’assurer que l’épaisseur de paille corresponde à celle généralement obtenue par le producteur lors de son application avec la machinerie et qu’elle était uniformément répartie sur les rangs d’ail.

L’EF de printemps (FGP) ainsi que le sulfate de K ont été appliqués le printemps suivant (site 1 : 2020 et site 2 : 2022). La paille, lorsque présente, a été retirée manuellement pour permettre de tracer un sillon à la binette d’environ 2 pouces de profond à ± 10 cm du plant. L’engrais y a été appliqué (Figure 3) et le sillon a été refermé au râteau. La paille a ensuite été replacée manuellement par-dessus le sillon. Dans les parcelles sans paille, l’engrais a également été appliqué dans un sillon près des plants.



Figure 3. Vue de l'application des FGP au printemps. À gauche : sillon et application de FGP dans une parcelle avec paille. À droite : sillon et application de sulfate de K dans une parcelle sans paille.

Tableau 4. Principales opérations culturales et prises de mesures pour les deux cycles de production.

Opérations	Site 1 (2019-2020)		Site 2 (2021-2022)	
	Dates	JAP	Dates	JAP
An 1				
Caractérisation de sol	19-juin	-82	16-juin	-90
Semis des EV	25-juin	-76	29-juin	-77
Caractérisation des EV	13-août	-27	19-août	-26
Fauche et incorporation des EV	13-août	-27	21-août	-24
Application des engrais d'automne (« broiler » et poudre d'os)	09-sept	0	14-sept	0
Plantation des caïeux, prélèvement de sol	09-sept	0	14-sept	0
Installation des instruments de suivi de température et des précipitations	10-sept	1	15-sept	1
Application de la paille	25-sept	16	13-oct	29
Prélèvement de sols	22-oct	43	27-oct	43
An 2				
Stade reprise des plants	09-avr	213	25-avr	223
Prélèvement de sol	15-avr	219	25-avr	223
Application des engrais de printemps (FGP et K), prélèvement de sol	29-avr	233	03-mai	231
Pré-bulbaison: prélèvement de sols et de plants, désherbage manuel	26-mai	260	31-mai	259
Bulbaison (SP ¹): prélèvement de sols et de plants	30-juin	295	28-juin	287
Bulbaison (P ¹): prélèvement de sols et de plants, désherbage manuel	07-juil	302	06-juin	265
SP: prélèvement de sol (stabilité des agrégats), évaluation des maladies	21-juil	316	26-juil	315
P: prélèvement de sol (stabilité des agrégats), évaluation des maladies	21-juil	316	01-août	321
Récolte (SP): prélèvement sol et plants, nettoyage et début séchage bulbes	29-juil	324	26-juil	315
Récolte (P): prélèvement sol et plants, nettoyage et début séchage bulbes	06-août	332	01-août	321
2 semaines post séchage (SP): classement et évaluation	12-août	338	08-août	328
2 semaines post séchage (P): classement et évaluation	19-août	345	16-août	336
Évaluation post-entreposage	19-nov	437	19-déc	461

¹P : parcelles avec pailles. SP : parcelles sans paille.

3.4 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET ANALYSES STATISTIQUES

Le dispositif expérimental comportait quatre blocs de huit traitements pour un total de 32 parcelles une fois tous les traitements appliqués au printemps de chaque cycle d'essai (Figure 4). Huit bandes avec (5) ou sans (3) EV ont été établies de manière aléatoire et perpendiculaire aux blocs. Ensuite, les traitements de régie ont été établis aléatoirement dans chaque bloc, selon qu'ils incluaient (T2-T3-T4-T6-T7) ou non (T1, T5, T8) des EV. Les parcelles mesuraient 5,60 m de largeur par 7 m de longueur, pour une superficie de 39 m². Chaque parcelle comportait 3 planches de trois rangs d'ail : une planche centrale dédiée à la prise des différentes mesures, et deux planches de garde de part et d'autre de cette dernière. Les planches mesuraient 1,37 m avec un espacement de 1,84 m centre-centre. Un plan d'échantillonnage a été élaboré pour s'assurer qu'aucun prélèvement de sols ou de plants ne soit effectué dans les zones de rendements ou de suivi *in situ* des flux de N et de P.

Toutes les analyses statistiques du projet ont été effectuées avec la procédure mixed de SAS® (SAS Institute Inc., 2013), version 9.4. L'effet des EV a été mesuré par une analyse de la variance avec l'erreur résiduelle comme source d'erreur. Quant aux traitements de régie, l'analyse de la variance a été effectuée en considérant le dispositif comme un plan en blocs aléatoires complets en considérant les blocs, les bandes d'EV et l'erreur résiduelle comme source d'erreur. La plupart des analyses ont été faites en transformant les variables réponses en log pour satisfaire les postulats du modèle. Dans le cas où la variable réponse était une proportion, la transformation angulaire a été utilisée. L'année, la période, le traitement (EV ou EF) ont été considérés comme effets fixes. Dans le cas de l'analyse des flux d'ions au moyen des MEI, la période était considérée comme un effet de mesures répétées.

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 ($P < 0,05$) par le test de F, les différences entre les moyennes ont été explorées au moyen de tests de *Student* (test t).

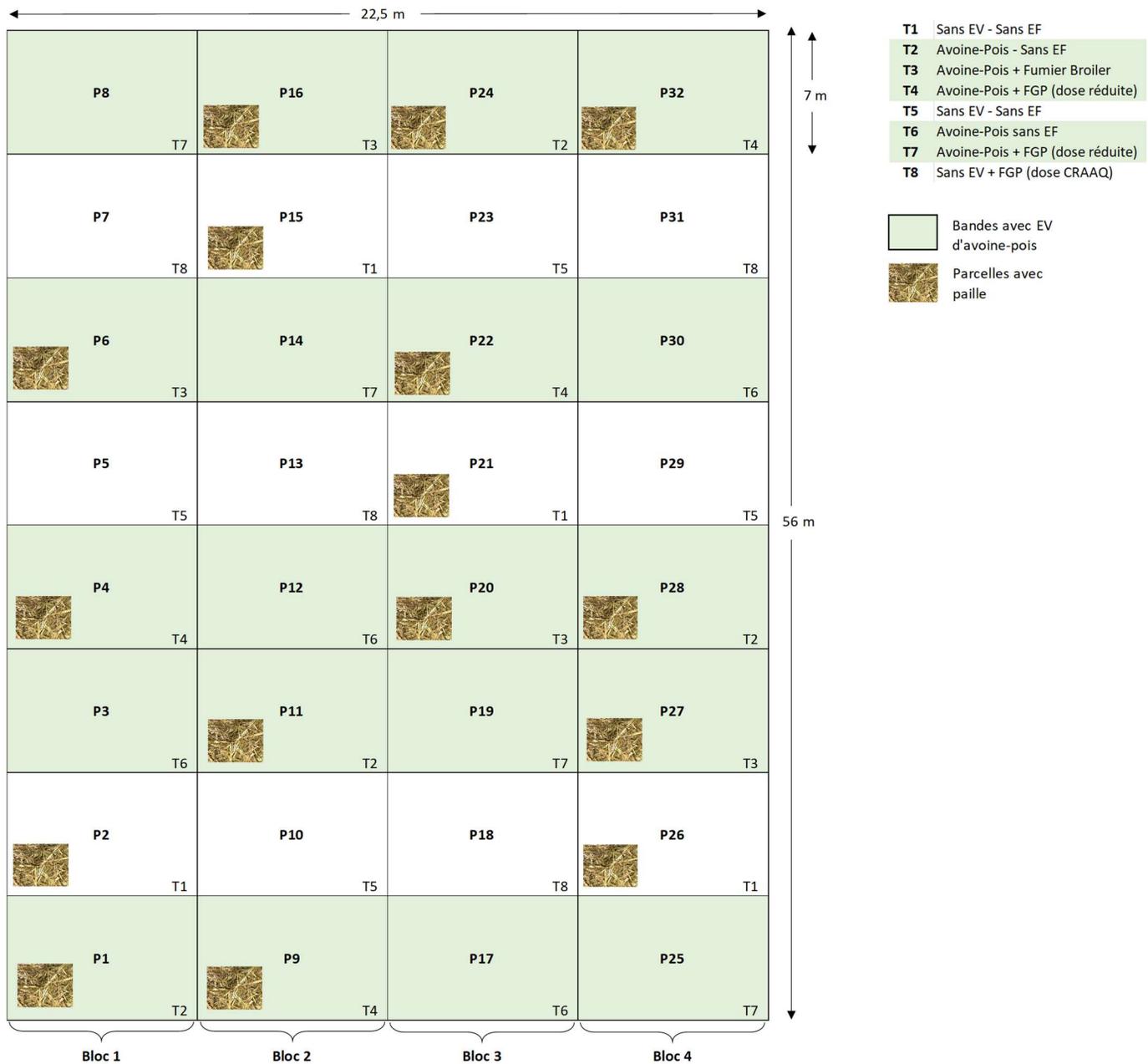


Figure 4. Dispositif expérimental établi à la Ferme le Petit Mas pour les deux cycles d'essais.

3.5 COLLECTE DE DONNÉES

3.5.1 Caractérisation des EV et EF

Juste avant l'enfouissement des bandes d'EV, quatre quadrats de 0,25 m² (50 X 50 cm) ont été prélevés dans chacune des bandes afin de connaître la biomasse aérienne des EV. Les échantillons composites (1 par bande) ont été analysés pour leurs contenus en C et éléments majeurs et mineurs. Les EF (FGP et FB) ont aussi été caractérisés au niveau physico-chimique, en triplicata, avant leur utilisation pour calculer les doses à épandre et afin de permettre la meilleure compréhension possible de leur effet sur la fertilité du sol et la nutrition des cultures. Les éléments mesurés et les méthodes d'analyses de végétaux et d'engrais organiques sont listés dans le Tableau 5.

Tableau 5. Méthodes d'analyse de laboratoire des variables mesurées sur les végétaux et les engrais organiques.

Variables mesurées	Méthodes d'analyse
Végétaux	
Azote total (N)	Combustion LECO
Carbone total (C)	Combustion LECO
Phosphore (P)	
Potassium (K)	
Calcium (Ca)	
Magnésium (Mg)	Digestion à l'acide nitrique et au peroxyde d'hydrogène et dosage à l'ICP optique (Gavlak et coll., 1991)
Aluminium (Al)	
Éléments mineurs (B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Na, Ni, Cd, Co, Pb, Ba, Sr, S)	
Engrais organiques (FGP et FB)	
pH _{eau}	Pâte amenée à saturation, mesure par électrode combinée (CPVQ, 1988)
Matière organique (MO)	Perte au feu à 500°C (Standard Methods for Examination of Waste and Wastewater, 2005)
Matière sèche (MS)	Séchage à 105°C pendant 16 heures
Phosphore soluble à l'eau (P _{eau})	Agitation pendant 2 heures d'une solution d'EO (3 g pour 30 ml d'eau). Analyse par colorimétrie automatisée SEAL Technicon.
Phosphore minéralisable au HCl (P _{min})	Extraction au HCl 2,5 N. Dosage par colorimétrie automatique d'un système FIA (Salomons et coll., 1981)
Potassium soluble à l'eau (K _{eau})	Agitation pendant 2 heures d'une solution d'EO (3 g pour 30 ml d'eau). Dosage par ICP.
Carbone total (C)	Mesure par un appareil TOC de Shimadzu
Carbone organique soluble à l'eau (COT)	Mesure sur un extrait centrifugé avec ajout de HCl pour libérer le C inorganique (Garcia et coll., 1991)
Azote total (NTK)	Méthode Kjeldahl (digestion sulfurique par voie humide). Dosage par colorimétrie.
Azote minéral (N-NO ₂ -NO ₃)	Extraction au KCl 2M et analyse colorimétrique automatisée (CPVQ, 1993)
Azote minéral (NH ₄)	Extraction au KCl 2M et analyse colorimétrique automatisée (Recommended Methods of Manure Analysis, 2003)
Phosphore (P)	
Potassium (K)	
Calcium (Ca)	Digestion (EPA 3050) à l'acide nitrique et au peroxyde d'hydrogène.
Magnésium (Mg)	Détermination des métaux lourds par spectrométrie d'émission au plasma d'argon (U.S. Environmental Protection Agency, 1996)
Éléments mineurs (Na, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Ni, Cd, Cr, Co, Pb, S, Ba et Sr)	

3.5.2 Analyses physiques, chimiques et biologiques du sol

Plusieurs échantillonnages de sol ont eu lieu au cours du projet. Les moments ciblés du cycle de culture pour les échantillonnages étaient : avant le semis d'EV, à la plantation de l'ail, avant les gelées à l'automne, au stade reprise de l'ail (printemps suivant), au stade pré-bulbaison, au stade bulbaison et à la récolte. Les dates exactes de ces échantillonnages pour les deux cycles d'essais sont présentées dans le

Tableau 4. Les sols ont été placés dans une glacière et conservés à 4°C jusqu'à leur préparation. L'échantillonnage de sol pour caractérisation physico-chimique avant l'implantation des EV a été effectuée par bloc sur la strate 0-20 cm. En saison, les échantillons ont été prélevés par parcelle sur la strate 0-20 cm. À la toute fin du cycle, après la récolte, la zone de prélèvement a été étirée à 0-40 cm pour quantifier la présence de nitrate résiduel sur cet horizon. Les échantillons

composites étaient composés de 4 à 12 sous-échantillons par parcelle, selon la quantité de sol à prélever et la profondeur de l'échantillonnage. Les formes labiles de N (N-NO₃, N-NH₄), P et K (P_{eau}, K_{eau}) disponibles à la culture ont été mesurées, de même le carbone labile (C_{eau} et C_{POX}) comme indicateurs de santé des sols. L'activité biologique du sol a été quantifiée par incubation aérobie (0-10 jours à température pièce) par la mesure du dégagement de CO₂ (respiration microbienne) et la production de N minéral par minéralisation du N organique. Les méthodes d'analyses du laboratoire agroenvironnemental de l'IRDA, pour les différentes variables analysées, sont présentées dans le Tableau 6. Des analyses supplémentaires pour certaines variables de santé des sols (azote labile Solvita, respiration Solvita et carbone actif) ont été effectuées par le laboratoire d'Agro-Enviro-Lab. Finalement, 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 éléments mesurés et les méthodes d'analyses sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6. Méthodes d'analyse de sols du laboratoire de l'IRDA et d'AEL.

Variables mesurées	Méthodes d'analyse
Laboratoire IRDA	
pH _{eau}	Mesuré dans un rapport sol/eau de 1:1 (CPVQ, 1993)
Matière organique (MO)	Perte au feu à 375°C
Phosphore soluble à l'eau (P _{eau})	Méthode Sissingh (1971), dosage par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon)
Potassium soluble à l'eau (K _{eau})	Spectrométrie d'émission au plasma
Carbone actif (C _{POX})	Méthode d'oxydation au permanganate (POXC) (Weil et coll., 2003)
Carbone organique soluble à l'eau (C _{eau})	Mesure sur un extrait centrifugé avec ajout de HCl pour libérer le C inorganique (Garcia et coll., 1991)
Azote minéral (N-NH ₄ + N-NO ₃)	Extraction au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976), dosage par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon)
Pouvoir de minéralisation de l'azote (N-NH ₄ + N-NO ₃) 0 et 10 jours	Pouvoir de minéralisation par incubation (10 jours en conditions aérobies). Incluant l'extraction au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976), dosage par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon)
Respiration microbienne (CO ₂)	Incubation (10 jours) avec captation du CO ₂ par NaOH 1N. Titrage acidimétrique au HCl 1N.
Uréase	Incubation (2 heures) avec solution d'urée. N-NH ₃ mit en solution avec KCl 1N et HCl 0,01M. Dosage par colorimétrie SEAL (Methods of soil analysis, Part 2, 1983).
Phosphore (P)	
Potassium (K)	
Calcium (Ca)	
Magnésium (Mg)	Extraction au Mehlich-3 (M3) (Tran et coll. 1992) et dosage à l'ICP optique
Aluminium (Al)	
Fer (Fe)	
Texture (sable, argile et limon)	Granulométrie par densimétrie et tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986)
Stabilité des agrégats	Sur sol entier (0-8 mm). Agitation mécanique pour obtention d'agrégats stables dans l'eau (Method of soil analysis, 1986)
Laboratoire AEL	
Azote labile Solvita	Extraction de l'azote ammoniacal N-NH ₃ à l'aide d'une solution basique et fixation sur une sonde de la technologie SOLVITA®. Dosage par colorimétrie.
Respiration C-CO ₂ Solvita	Absorption sur sonde de la technologie SOLVITA® (Woods End® Laboratories Inc., USA). Dosage par colorimétrie (Brinton, 2016).
Carbone actif	Méthode d'oxydation au permanganate (POXC) et mesure au spectrophotomètre portatif (Weil et coll., 2003)

3.5.3 Suivi de la température du sol et données météorologiques

Suivant la plantation des caïeux, des enregistreurs de température HOBO pendant (modèle ONSET UA-001-64) ont été installés dans le sol, à huit endroits dans le dispositif (deux blocs (#1 et #2) et 4 traitements), soit dans un traitement recevant un recouvrement hivernal de paille (avec et sans EV) et sans paille (avec et sans EV). Ils ont été positionnés légèrement en dessous de la profondeur de plantation des caïeux, soit à 7-10 cm de profondeur (Figure 5). Les enregistreurs sont demeurés en place jusqu'à la récolte en juillet. Aucune irrigation n'a eu cours pendant l'essai. L'eau apportée à la culture provenait uniquement des précipitations. Celles-ci ont été enregistrées en continu par un pluviomètre (ONSET modèle RG3-M) installé les deux années au site d'essai. Les conditions de température de l'air ($^{\circ}\text{C}$ Max et $^{\circ}\text{C}$ Min) ont aussi été enregistrées par une sonde de température sur le site.



Figure 5. Sonde de température HOBO installée légèrement sous le caïeu.

3.5.4 Suivi *in situ* et analyses chimiques des MEI

Le suivi *in situ* en continu de la dynamique de l'azote (N-NO_3) et du phosphore (P-PO_4) du sol avec des membranes d'échange ionique (MEI) (Figure 6) a été effectué pour les deux cycles d'essais (Tableau 7). Les MEI (anionique AR204-SZRA, Ionics Inc., Watertown, MA) captent de façon cumulative tous ions NO_3^- et PO_4^- se rendant jusqu'à elles dans le sol. La mesure des quantités captées par période est exprimée en flux, soit une quantité par unité de surface et de temps ($\mu\text{g cm}^{-2}$ période $^{-1}$). Ce suivi *in situ* permet de comparer les délais de libération de N et P disponibles à la culture selon divers EV et EF et de suivre les pics de disponibilité des diverses régions. Chaque MEI est insérée dans le sol de façon à couvrir verticalement le milieu de la strate utile (0-20 cm). Trois MEI étaient insérées dans chacune des parcelles, à environ 10 cm d'un plant, et étaient retirées et remplacées environ aux deux semaines (Tableau 7). 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.



Figure 6. Pose de la membrane d'échange ionique à proximité des plants pour le suivi *in situ* du N et du P.

Tableau 7. Période de pose-retrait des membranes d'échanges ioniques pour les deux cycles de culture.

Site 1 (2019-2020)			Site 2 (2021-2022)		
Pose MEI	Retrait MEI	Durée de la période (jours)	Pose MEI	Retrait MEI	Durée de la période (jours)
An 1					
20-août	03-sept	14	26-août	09-sept	14
10-sept	25-sept	15	15-sept	29-sept	14
25-sept	09-oct	14	29-sept	13-oct	14
09-oct	22-oct	13	13-oct	27-oct	14
An 2					
15-avr	29-avr	14	25-avr	03-mai	8
29-avr	13-mai	14	03-mai	18-mai	15
13-mai	26-mai	13	18-mai	31-mai	13
26-mai	09-juin	14	31-mai	14-juin	14
09-juin	23-juin	14	14-juin	28-juin	14
23-juin	07-juil	14	28-juin	11-juil	13
07-juil	21-juil	14	11-juil	26-juil	15
21-juil	29-juil	8			
29-juil	06-août	16			

3.5.5 Développement et nutrition des plants et rendements

Pour mesurer le développement des plants au cours de la saison, des plants ont été prélevés à trois stades (pré-bulbaison, bulbaison et récolte). Tous les échantillons de plants (tiges et bulbes) ont été séchés à 65°C et broyés à 100 mesh avant analyse (méthodes d'analyse des végétaux listées au Tableau 5). Au stade pré-bulbaison, la biomasse aérienne de 10 plants par parcelle a été prélevée pour analyse (C, N, éléments majeurs et S) et pour évaluation de la masse sèche (MS) moyenne

des plants. Au stade bulbaison, moment clé de croissance active des plants, la partie aérienne (incluant la fleur d'ail) et les bulbes (sans les racines) de 16 plants par parcelle ont été séchés, pesés et analysés pour leur contenu en azote. La MS moyenne des plants a également pu être mesurée.

En fin de production, les rendements ont été évalués dans chacune des parcelles sur 4,5 m linéaires (1,52 m sur les 3 rangs) dans la zone préétablie de la planche centrale, pour une superficie de 2,08 m². Suivant la récolte des plants, les parties aériennes ont été séparées des bulbes et conservées pour analyse (éléments majeurs NPK et S) et mesure de la biomasse (masse sèche (MS)). Les bulbes ont été nettoyés afin d'en retirer la terre. Ils ont ensuite été mis à sécher à l'entrepôt du producteur pour une durée d'environ 14 jours. À leur sortie, ils ont été pesés et dénombrés un à un afin de les classer en bulbes vendables et non vendables. Les critères suivants ont été évalués: poids frais et poids sec des bulbes (après séchage en entrepôt), nombre de caïeux/bulbe (visuel), poids moyen des caïeux (calcul), aspect structurel et commercialisable (verdissement, éclatement, surdivision et coloration brunâtre des caïeux) et calibres vendables (20-30 g, 30-50 g, >51 g). Les rendements vendables correspondent donc au poids des bulbes commercialisables récoltés sur la zone de rendement uniformisé à 53 % d'humidité, exprimés en kg ha⁻¹. Cependant, comme divers facteurs (pourcentage de levée, maladies, etc.) peuvent affecter le nombre de plants des zones de rendements, les rendements en gr plant⁻¹ ont également été analysés. À l'image des tiges, des analyses ont été effectuées sur les bulbes (N, éléments majeurs et S) afin de permettre le calcul des prélèvements totaux et des exportations des plants. Ces paramètres ont été calculés comme suit :

Prélèvement N biomasse en saison = (MS biomasse * concentration en N_{total})

Prélèvement N totaux = (Rendements totaux bulbes et tiges (b.s) * concentration en N_{total} des tiges et des bulbes)

Exportations de N = (Rendements totaux bulbes (b.s) * concentration en N_{total} des bulbes)

Rendements en bulbes vendables (kg ha⁻¹) = (Rendements bulbes (à 53 % humidité) * Superficie de la zone de rendements)

À plusieurs reprises en saison, une évaluation visuelle a été effectuée pour noter la présence de maladies sur les plants.

3.5.6 Évaluation post-entreposage

Suivant l'évaluation des rendements, des bulbes sains ont été conservés et entreposés pendant 3- 4 mois afin de mesurer l'impact des différents traitements de fertilisation sur la conservation de l'ail. Pendant cette période, une sonde température et d'humidité de type HOBO a été installée afin de connaître les conditions d'entreposage. À la sortie de l'entrepôt, les bulbes ont été examinés un à un afin de vérifier l'apparition de signes de détérioration (taches brunes, pourriture, germination, ratatiné (mou)). Lorsque possible, le nombre et le poids pour chaque sous-classe ont été comptabilisés. Des photos de bulbes sains et malades ont été prises afin de documenter l'évaluation en entrepôt.

3.6 ANALYSE ÉCONOMIQUE

Pour estimer le gain économique des différentes stratégies testées, une évaluation des revenus potentiels (pour un calibre moyen et par catégories de calibres) et des coûts de production additionnels associés aux différents traitements a été effectuée pour les deux cycles d'essais. Les calculs ont été faits en considérant un contexte de ferme aux opérations semi-mécanisées. Le budget présenté est un budget partiel. Les coûts de production associés à chaque traitement (engrais, paille et opérations culturales associées à ces ajouts) ont été estimés à l'aide des références économiques du CRAAQ (AGDEX 258/821c, AGDEX 537/821b et AGDEX 740/825) ainsi que des prix de fournisseurs. Il est à noter que les autres coûts variables, soit les semences, la main-d'œuvre, et la mise en marché ainsi que les coûts fixes (bâtiments, terrains, etc.) ne

sont pas considérés dans cette analyse. Des frais supplémentaires de mise en marché et de manutention (nettoyage et emballage des bulbes) seraient à considérer pour des traitements occasionnant de plus grands rendements. En ce qui a trait aux revenus, le calcul a été effectué selon les rendements vendables obtenus dans chaque traitement, en considérant un prix moyen de 22,50\$ kg⁻¹ ou un prix par calibre (petit : 19,50\$ kg⁻¹, moyen : 22,50\$ kg⁻¹ et gros : 26,50\$ kg⁻¹) pour le contexte de vente au détail. Les revenus pourraient ainsi varier selon les types de mise en marché préconisés par l'entreprise.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 CONDITIONS CLIMATIQUES ET TEMPÉRATURE DU SOL

4.1.1 Suivi météorologique

Les conditions météorologiques des deux cycles d'essais (1^{er} cycle : 2019-2020; 2^e cycle : 2021-2022) (Figure 7 et Figure 8) ont été très différentes. Lors du 1^{er} cycle, les températures de l'air du début d'automne ont été plus douces que la normale (1981-2010), mais la fin octobre et le mois de novembre ont été plus froids (« Tempête de l'Halloween 2019 »). Suivant l'hiver, la saison de production a été caractérisée par des températures qui ont remonté lentement au printemps pour atteindre un plateau autour de la fin mai. Par la suite, les températures sont demeurées élevées avec une température moyenne journalière (moy. Jour-nuit; mi-mai à fin juillet) de 19,2°C. En termes de précipitations, la saison a été sèche avec des pluies peu fréquentes (29 évènements au total) et regroupées lors d'évènements sévères. Ainsi, 63 % des précipitations sont tombées en seulement 6 évènements. Au contraire, lors du 2^e cycle d'étude (2021-2022), l'automne a été le 5^e plus chaud des 100 dernières années. Au printemps, les températures ont remonté plus rapidement qu'en 2020, soit un mois plus tôt, mais elles ont plafonné plus bas. Ainsi, la température moyenne journalière entre la mi-mai et la fin juillet a été de 2 degrés de moins qu'en 2020, soit 17,6°C. Ce fut par ailleurs une saison pluvieuse comportant 49 évènements de précipitations, soit 70 % plus qu'en 2020. Ces pluies plus légères, mais fréquentes, en plus d'un climat plus frais, ont mené à des conditions propices au développement de maladies.

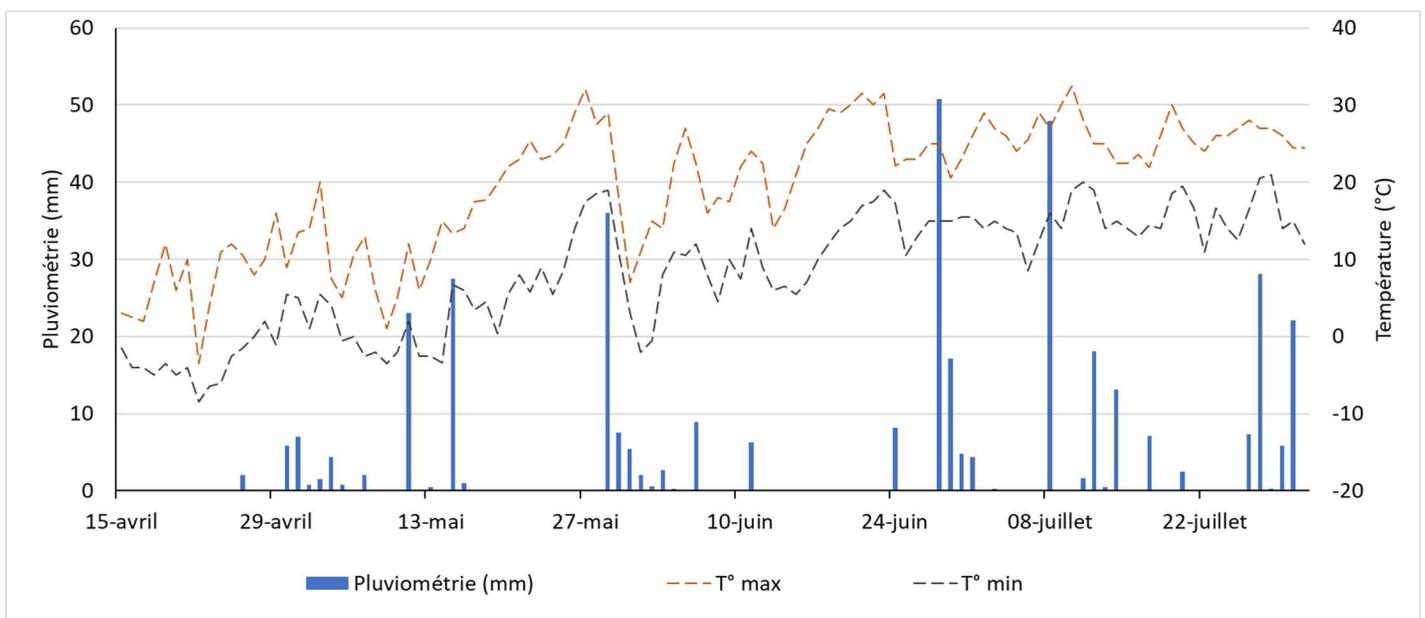


Figure 7. Données climatiques au site d'essai pour la saison 2020, enregistrées sur le site d'essai sauf pour les données du 15 avril au 12 mai qui proviennent de la station météo de St-Malo d'Auckland (Latitude: 45.2; Longitude:-71.5).

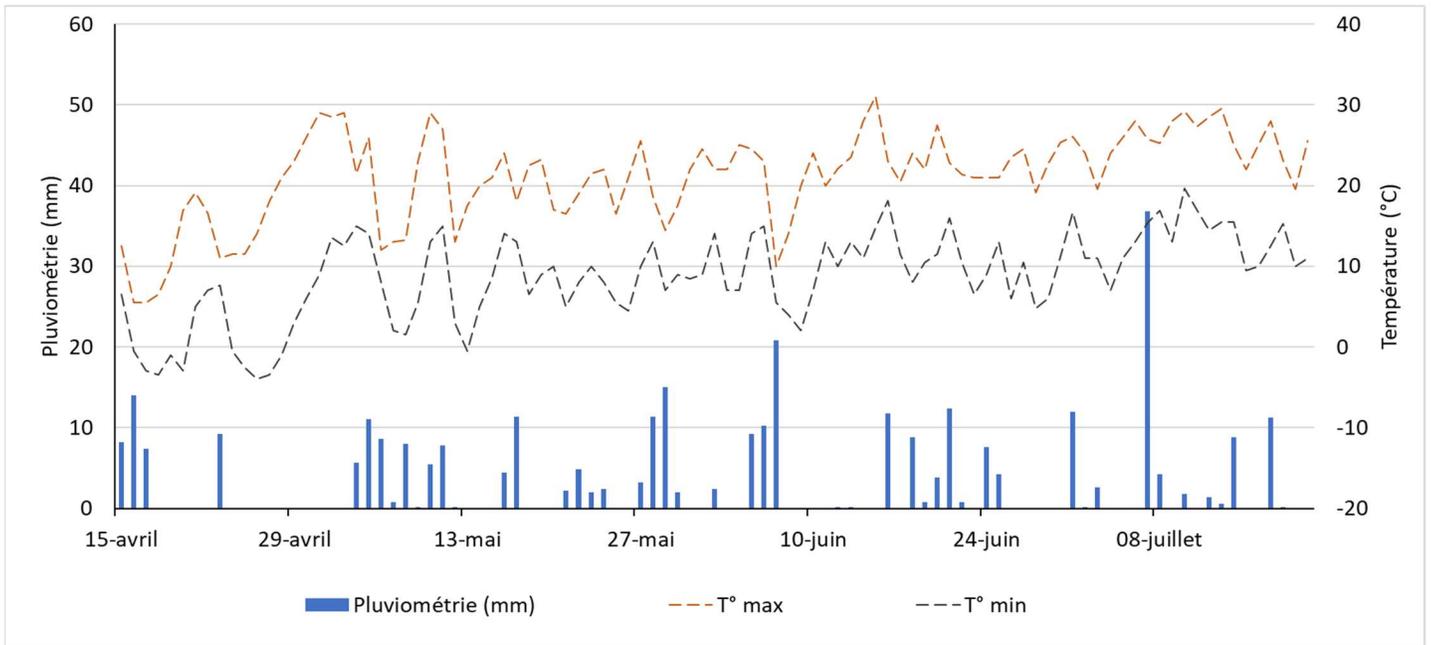


Figure 8. Données climatiques au site d'essai pour la saison 2022, enregistrées sur le site d'essai sauf pour les données du 15 au 25 avril qui proviennent de la station météo de St-Malo d'Auckland (Latitude: 45.2; Longitude:-71.5).

4.1.2 Impact du paillage

Les deux années, la paille a eu un effet marqué au niveau de la température du sol, plus spécifiquement lors de la saison plus chaude de 2020 (Figure 9). En général, il a fait moins froid en automne sous la paille et il a fait plus frais en été les deux saisons. Ainsi, la température est plus constante avec couvert végétal de paille. Ceci est très marqué en fin d'automne 2019, où les températures ont été très froides (section 4.1.1) et encore plus en été 2020, alors qu'il y avait canicule. Des différences de plus de 5-7°C ont été enregistrées, et ce, pendant plusieurs jours-semaines. Lors du second cycle de culture de l'ail, les différences, bien que présentes, ont cependant été moins prononcées.

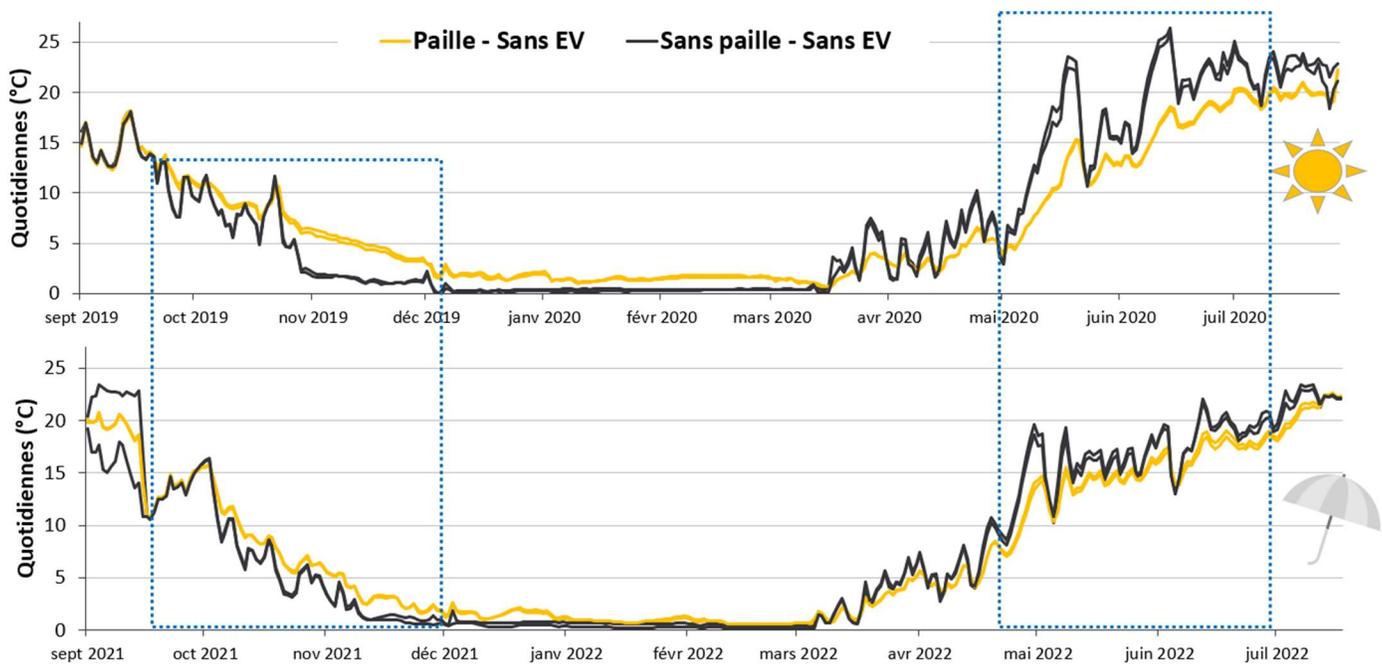


Figure 9. Suivi de la température du sol sous les paillis sur l'ensemble des mois de production des 1^{er} et 2^e cycle d'essais.

4.2 CARACTÉRISATION DES CONTENUS EN NPK DES ENGRAIS VERTS ET DE FERME ET VALEUR FERTILISANTE

En ce qui a trait aux EV, les mesures effectuées indiquent qu'en 50 jours de croissance, ceux-ci ont produit en moyenne 28 et 40 t ha⁻¹ (b.h.) de biomasse avec des teneurs moyennes en N de 2,34 % et 1,75 % lors des étés 2019 et 2021, respectivement (Tableau 8). Ainsi, d'une année à l'autre, pour un EV de composition de semis identique, la biomasse peut varier de près de 40 % et le contenu en N de 30 %. Ceci pourrait s'expliquer par le stade de développement ou la proportion présente de graminées lors de la coupe, deux variables modulées par les dates de semis et les températures saisonnières. Néanmoins, la quantité de N_{eff} produite a été semblable les deux saisons, avec 35 et 30 kg N_{eff} ha⁻¹ lors du 1^{er} et 2^e cycle de production, respectivement, ce qui démontre l'avantage de semer des mélanges. En ce qui a trait au phosphore (P) et au potassium (K) des EV, il n'existe pas de coefficient d'efficacité (CE) officiel permettant de calculer les quantités efficaces (disponibles à la culture). Dans le présent projet, ces quantités n'ont donc pas été considérées au moment de calculer les apports à réaliser en intrants pour atteindre les quantités visées de P et K. Les contenus totaux, convertis par calcul en P₂O₅ et K₂O, sont tout de même rapportés au Tableau 8. Ces analyses permettent de constater le contenu relativement faible en P₂O₅ (en moyenne de 31 kg ha⁻¹), mais particulièrement élevé en K₂O (en moyenne de 160 kg ha⁻¹) des EV. Vu les quantités de K mesurés, il serait justifié de mener des travaux afin d'établir sa disponibilité à la culture sur le court et moyen terme, d'autant plus qu'un tel résultat a déjà été mesuré lors d'études antérieures menées au Québec sur les EV (Landry et coll., 2016, Landry et coll., 2020).

Tableau 8. Contenus en éléments nutritifs des engrais verts des cycles 1 et 2 d'essais.

Année	Biomasse t ha ⁻¹ b.h.	N _{total} kg ha ⁻¹ b.s	N %	N _{eff} ¹	kg ha ⁻¹ b.s.		
					P ₂ O ₅ total ²	K ₂ O total ²	SO ₃ total ²
2019	28	79	2,34	35	27	134	18,3
2021	40	82	1,75	30	35	186	17,5

¹ N_{eff} selon Jobin et Douville (1996) dans Duval et coll. (2014).

² Contenus totaux et non efficaces (disponibles) exprimés par calcul sous forme de P₂O₅ (facteur 2,29), K₂O (facteur 1,2) et SO₃ (facteur 2,49).

Les caractéristiques des engrais de ferme, soit le fumier de « broiler » (FB) et les fientes granulées de poules (FGP), sont résumées au Tableau 9. Tel qu'attendu, le FB présente un C/N plus élevé et un contenu en N total plus faible que les FGP dû, entre autres, à la présence de la ripe de bois. Il est aussi connu que le FB présente un indice de stabilité (ISB) du carbone (C) plus élevé que les FGP (Landry et coll., 2020). Les FGP contiennent en effet une quantité appréciable de C labile, source d'énergie pour les microorganismes du sol, dont il stimule l'activité (dont celle de minéralisation du N organique en N minéral disponible). La dégradation du FB devrait ainsi se faire plus lentement, surtout au vu de son application en fin d'été, alors que les sols tendent à se refroidir au cours de l'automne qui suit, contrairement aux FGP appliquées au printemps, alors que les températures remontent. Tel que discuté à la section suivante, les flux de N mesurés par les MEI vont en ce sens puisque les deux automnes, la présence de FB n'augmente pas les flux de nitrate en comparaison de ceux des sols témoins (0EV-0EF), comparativement des FGP qui font augmenter fortement et rapidement les flux de nitrate au printemps. Les caractéristiques de chacun des EF entraînant des coefficients d'efficacité du N différents (CRAAQ 2010), les volumes à épandre pour atteindre les quantités visées de N sont beaucoup plus élevés pour le FB que les FGP. De ce fait, la fertilisation au FB apporte de façon concomitante des quantités plus élevées de P et K que celle avec FGP, jusqu'à plus de 3 fois, tel que l'illustre les bilans d'apports en N, P et K des huit régies testées aux Tableau 10 à Tableau 15. Tel que discuté à la section 4.3, cela se répercute sur les flux de PO₄ du sol, tant en automne qu'au printemps suivant. Au global, l'apport en N_{eff} des EV s'est avéré sous le 50 kg N_{eff} ha⁻¹ attendu *a priori*. Cependant, l'apport total en N des régies avec EV s'est quand même grandement approché de la quantité visée (110N) puisque suivant les analyses des EF appliqués, il appert que ceux-ci étaient légèrement plus riches en N qu'estimés *a priori* (Tableau 10 et Tableau 11). Les huit régies ont donc bel et bien permis de comparer des apports contrastés de N_{eff} de 30-35 kg ha⁻¹ pour les régies d'EV seuls et de 95 -110 kg ha⁻¹ pour les régies avec EV + EF. Dans le cas de la régie T8 avec FGP seules, l'apport visé de 110N a été atteint les deux saisons.

Tableau 9. Caractérisation physicochimique des engrais de ferme des cycles 1 et 2 d'essais.

Paramètres	Broiler (2019)	Broiler (2021)	Actisol (2019) ¹	Actisol (2022)
Quantités appliquées (t ha ⁻¹)	4,4	3,3	1,1	1,6
Acidité (pH)	7,6	6,9	7,2	7,2
Matière sèche (%)	82,6	69,4	89,6	90,3
Matière organique (%)	81,4	83,1	71,2	72,4
C total (kg t ⁻¹)	407	416	356	362
Azote total (kg t ⁻¹)	27,0	35,1	49,0	44,8
Azote ammoniacal (kg t ⁻¹)	2,9	5,1	2,01	1,49
Azote nitrate (kg t ⁻¹)	0,006	0,012	0,034	0,187
Phosphore (kg P ₂ O ₅ t ⁻¹)	27,8	17,5	34,2	28,1
Potassium (kg K ₂ O t ⁻¹)	26,1	21,4	27,4	24,6
S (mg kg ⁻¹)	NA	9320	NA	4258
C/N	12,5	8,2	7,0	7,3
P soluble (kg t ⁻¹)	1,29	0,97	1,56	0,86

¹ Données moyennes de nos analyses internes.

Tableau 10. Bilan des apports en N total et efficace de chacune des régions testées, cycle 1 (2019-2020).

Traitements	Paille	Apports en N des EV (kg ha ⁻¹)		Apports en N des EF (kg ha ⁻¹)			EV + EF (kg ha ⁻¹)
		N _{total}	N _{eff} ¹	Dose (t ha ⁻¹)	N _{total}	N _{eff}	N _{eff}
T1 Sans EV - Sans EF	Paille	-	-	-	-	-	0 (15) ⁴
T2 Avoine-Pois - Sans EF		79	35	-	-	-	35 (50) ⁴
T3 Avoine-Pois + FB60		79	35	4,4	118	55 ²	90 (105) ⁴
T4 Avoine-Pois + FGP60		79	35	1,1	53	45 ³	80 (95) ⁴
T5 Sans EV - Sans EF	Sans paille	-	-	-	-	-	0 (15) ⁴
T6 Avoine-Pois sans EF		79	35	-	-	-	35 (50) ⁴
T7 Avoine-Pois + FGP60		79	35	1,1	53	45 ³	80 (95) ⁴
T8 Sans EV + FGP110		-	-	2,3	112	95 ³	95 (110) ⁴

¹ N_{eff} selon Jobin et Douville (1996) dans Duval et coll. (2014).

² Selon CE des équations du Tableau 10.4 du CRAAQ et un CE de perte de 15 % pour une application d'automne avec présence de culture.

³ Selon CE de 0,85 pour le N. Aucun CE de perte, puisqu'appliqué au printemps.

⁴ Quantité totale considérant l'apport de 15N provenant de la matière organique du sol dont la teneur dépasse 4 %.

Tableau 11. Bilan des apports en N total et efficace de chacune des régions testées, cycle 2 (2021-2022).

Traitements	Paille	Apports en N des EV (kg ha ⁻¹)		Apports en N des EF (kg ha ⁻¹)			EV + EF (kg ha ⁻¹) ⁴
		N _{total}	N _{eff} ¹	Dose (t ha ⁻¹)	N _{total}	N _{eff}	N _{eff}
T1 Sans EV - Sans EF	Paille	-	-	-	-	-	0
T2 Avoine-Pois - Sans EF		82	30	-	-	-	30
T3 Avoine-Pois + FB60		82	30	3,3	115	69 ²	99
T4 Avoine-Pois + FGP60		82	30	1,6	70	60 ³	90
T5 Sans EV - Sans EF	Sans paille	-	-	-	-	-	0
T6 Avoine-Pois sans EF		82	30	-	-	-	30
T7 Avoine-Pois + FGP60		82	30	1,6	70	60 ³	90
T8 Sans EV + FGP110		-	-	2,9	129	110 ³	110

¹ N_{eff} selon Jobin et Douville (1996) dans Duval et coll. (2014).

² Selon CE des équations du Tableau 10.4 du CRAAQ et un CE de perte de 15 % pour une application d'automne avec présence de culture.

³ Selon CE de 0,85 pour le N. Aucun CE de perte, puisqu'appliqué au printemps.

⁴ Aucun apport par la matière organique du sol.

Tableau 12. Bilan des apports de P total exprimés sous forme de P₂O₅ de chacune des régions testées, cycle 1 (2019-2020).

Traitements	Paille	Apports en équivalent P ₂ O ₅ ² (kg ha ⁻¹)				Bilan P ₂ O ₅ ³ (kg ha ⁻¹)	
		EV ¹	Poudre d'os	FB	FGP		
Dose minimale à assurer : 30 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹							
T1	Sans EV - Sans EF		0	30	0	0	30
T2	Avoine-Pois - Sans EF	Paille	27	30	0	0	30
T3	Avoine-Pois + FB60		27	0	121	0	121
T4	Avoine-Pois + FGP60		27	30	0	37	67
T5	Sans EV - Sans EF			0	30	0	0
T6	Avoine-Pois sans EF	Sans paille	27	30	0	0	30
T7	Avoine-Pois + FGP60		27	30	0	37	67
T8	Sans EV + FGP110		0	30	0	78	108

¹ Le P des EV n'a pas été considéré lors du calcul de la fertilisation visée en P. Afin de s'assurer de la quantité minimale recommandée de P en automne, de la poudre d'os a été appliquée dans les régions sans EF automnales.

² Apports totaux sans application de coefficient d'efficacité ou de perte.

³ Bilan excluant l'apport des EV puisque l'efficacité de ceux-ci est méconnue et que le P des EV n'est pas comptabilisé dans les plans de fertilisation.

Tableau 13. Bilan des apports de P total exprimés sous forme de P₂O₅ de chacune des régions testées, cycle 2 (2021-2022).

Traitements	Paille	Apports en équivalent P ₂ O ₅ ² (kg ha ⁻¹)				Bilan P ₂ O ₅ ³ (kg ha ⁻¹)	
		EV ¹	Poudre d'os	FB	FGP		
Dose minimale à assurer : 30 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹							
T1	Sans EV - Sans EF		0	30	0	0	30
T2	Avoine-Pois - Sans EF	Paille	35	30	0	0	30
T3	Avoine-Pois + FB60		35	0	57	0	57
T4	Avoine-Pois + FGP60		35	30	0	44	74
T5	Sans EV - Sans EF			0	30	0	0
T6	Avoine-Pois sans EF	Sans paille	35	30	0	0	30
T7	Avoine-Pois + FGP60		35	30	0	44	74
T8	Sans EV + FGP110		0	30	0	81	111

¹ Le P des EV n'a pas été considéré lors du calcul de la fertilisation visée en P. Afin de s'assurer de la quantité minimale recommandée de P en automne, de la poudre d'os a été appliquée dans les régions sans EF automnales.

² Apports totaux sans application de coefficient d'efficacité ou de perte.

³ Bilan excluant l'apport des EV puisque l'efficacité de ceux-ci est méconnue et que le P des EV n'est pas comptabilisé dans les plans de fertilisation.

Tableau 14. Bilan des apports de K total exprimés sous forme de K₂O de chacune des régions testées, cycle 1 (2019-2020).

Traitements	Paille	Apports en équivalent K ₂ O ² (kg ha ⁻¹)				Bilan K ₂ O ³ (kg ha ⁻¹)	
		EV ¹	Sulfate de K	FB	FGP		
Dose minimale à assurer : 125 kg K ₂ O ha ⁻¹							
T1	Sans EV - Sans EF		0	125	0	0	125
T2	Avoine-Pois - Sans EF	Paille	134	125	0	0	125
T3	Avoine-Pois + FB60		134	42	114	0	156
T4	Avoine-Pois + FGP60		134	95	0	30	125
T5	Sans EV - Sans EF			0	125	0	0
T6	Avoine-Pois sans EF	Sans paille	134	125	0	0	125
T7	Avoine-Pois + FGP60		134	95	0	30	125
T8	Sans EV + FGP110		0	63	0	62	125

¹ Le K des EV n'a pas été considéré lors du calcul de la fertilisation visée en K. Afin de s'assurer de la quantité minimale recommandée, du sulfate de potassium a été appliquée au printemps selon le K apporté par les EF des différentes régions.

² Apports totaux sans application de coefficient d'efficacité ou de perte.

³ Bilan excluant l'apport des EV puisque l'efficacité de ceux-ci est méconnue et que le K des EV n'est pas comptabilisé dans les plans de fertilisation.

Tableau 15. Bilan des apports de K total exprimés sous forme de K₂O de chacune des régions testées, cycle 2(2021-2022).

Traitements	Paille	Apports en équivalent K ₂ O ² (kg ha ⁻¹)			Bilan K ₂ O ³ (kg ha ⁻¹)		
		EV ¹	Sulfate de K	Broiler		FGP	
Dose minimale à assurer : 95 kg K ₂ O ha ⁻¹							
T1	Sans EV - Sans EF	0	95	0	0	95	
T2	Avoine-Pois - Sans EF	Paille	186	95	0	95	
T3	Avoine-Pois + FB60		186	37	70	0	107
T4	Avoine-Pois + FGP60		186	56	0	39	95
T5	Sans EV - Sans EF	Sans paille	0	95	0	0	95
T6	Avoine-Pois sans EF		186	95	0	0	95
T7	Avoine-Pois + FGP60		186	56	0	39	95
T8	Sans EV + FGP110		0	24	0	72	96

¹ Le K des EV n'a pas été considéré lors du calcul de la fertilisation visée en K. Afin de s'assurer de la quantité minimale recommandée, du sulfate de potassium a été appliquée au printemps selon le K apporté par les EF des différentes régions.

² Apports totaux sans application de coefficient d'efficacité ou de perte.

³ Bilan excluant l'apport des EV puisque l'efficacité de ceux-ci est méconnue et que le K des EV n'est pas comptabilisé dans les plans de fertilisation.

Vu l'importance du soufre pour la qualité de l'ail, cet élément a également fait l'objet d'un suivi. Afin de pouvoir calculer le bilan des apports par région, les contenus en S des EV et des EF ont donc été dosés (EF 2022 seulement) (Tableau 16Tableau 18). Ceci permet de constater la richesse relative en S du FB, en comparaison des FGP. Dans le cas des EV, la présence de crucifères pourrait probablement permettre de hausser le contenu en S, mais dans le mélange avoine-pois testé, celui-ci s'avère inférieur à celui des EF. À ces apports par les EV et EF, s'ajoutent ceux du sulfate de potassium (0-0-50-17,5%S) utilisé pour compléter la fertilisation potassique. Ainsi, dans les régions témoins OEV-OEF, comme tout l'apport en K était fait par l'engrais minéral, ces dernières ont bénéficié d'un apport non négligeable de S.

Le bilan détaillé des apports pour le second cycle d'étude (2021-2022) est présenté au Tableau 17. Ce bilan rapporte les quantités totales puisqu'il n'y a pas de coefficient officiel d'efficacité et de perte du S des EV et EF. Le S apporté par les EV et EF étant sous forme organique, celui-ci doit être minéralisé pour devenir disponible à la plante qui ne l'absorbe que sous forme d'ion de sulfate. Il est donc impossible de calculer un apport en S efficace. Cela dit, l'application seule des 3,3 t ha⁻¹ de FB apporte beaucoup plus de SO₃ total que les exportations moyennes pour les deux années (45 kg SO₃ ha⁻¹) (Tableau 20). De même, une région EV-FGP110 permet aussi de couvrir ces exportations. Cela dit, dû à l'emploi du sulfate de K, toutes les régions apportent une quantité de sulfate minéral efficace à 100 % similaire ou supérieure aux quantités exportées de SO₃ (excepté la région FGP110). Pour chaque région, même les régions témoins, le bilan total est donc élevé, allant de 50- 127 kg SO₃ ha⁻¹. Ceci pourrait expliquer pourquoi le type de fertilisation a très peu influencé la concentration en S des caïeux (Figure 26), ce qui n'est pas le cas de la paille qui a influencé celle-ci (voir section qualité).

Tableau 16. Teneurs et apports en soufre des engrais verts et de ferme, saisons 2022.

2022	Teneur et contenu en SO ₃		Apports en SO ₃ selon le taux d'apport ¹ kg ha ⁻¹
	S (%)	SO ₃ kg t ⁻¹	
EV avoine-pois	0,151	3,77	17,49
FGP60	0,426	10,65	17,04
FGP110	0,426	10,65	30,74
FB60	0,932	23,27	76,79

¹Taux d'apport : EV avoine-pois = 4 646 kg ha⁻¹, FGP60 = 1 600 kg ha⁻¹, FGP110 = 2 900 kg ha⁻¹, FB60 = 3 300 kg ha⁻¹.

Tableau 17. Bilan des apports de S total exprimés sous forme de SO₃ de chacune des régies testées, cycle 2 (2021-2022).

Traitements	Paille	Apports ¹ en équivalent SO ₃ ² (kg ha ⁻¹)			Bilan SO ₃ (kg ha ⁻¹)	
		EV	Sulfate de K	Broiler		FGP
T1 Sans EV - Sans EF	Paille	0	85	0	0	85
T2 Avoine-Pois - Sans EF		17	85	0	0	102
T3 Avoine-Pois + FB60		17	33	77	0	127
T4 Avoine-Pois + FGP60		17	50	0	17	84
T5 Sans EV - Sans EF	Sans paille	0	85	0	0	85
T6 Avoine-Pois sans EF		17	85	0	0	102
T7 Avoine-Pois + FGP60		17	50	0	17	84
T8 Sans EV + FGP110		0	19	0	31	50

¹ Apports totaux sans application de coefficient d'efficacité ou de perte.

² Le sulfate de potassium contient 45 % de S sous forme de SO₃

4.3 DYNAMIQUE DU N ET P DISPONIBLE DU SOL SUR LE CYCLE DE PRODUCTION

4.3.1 Période automnale

En automne, puisque les FGP ne sont pas encore appliquées, cinq régies sont comparées à partir du moment où la paille est apportée. Les flux captés sur les membranes d'échanges ioniques (MEI) indiquent principalement que, en comparaison des régies témoins (0EV-0EF) (Figure 10, Figure 11), l'apport de FB n'entraîne pas de pic de production de nitrate et que la présence d'EV incorporés abaisse la teneur de ceux-ci dans le sol.

Ainsi, l'application de FB n'entraîne pas de hausse significative des flux, malgré les fortes quantités de N total apportées (115-118 kg N_{total} ha⁻¹). Puisqu'il n'y a pas de régie FB sans paille et que celle-ci réduit très fortement les flux de N minéral, quel que soit l'EF en saison (Figure 12), il pourrait être pensé que la présence de paille a empêché de mesurer une hausse des flux de nitrate dû au FB. Cet effet, couplé à celui de la ripe, serait bénéfique puisqu'un pic de disponibilité n'est pas désiré en automne. Cela dit, la paille n'a été appliquée que 16 et 29 jours après l'incorporation du FB au sol. De plus, aucune différence statistique n'est mesurée pour les autres régies, dans leur version avec ou sans paille. Enfin, la présence de paille n'empêche pas en saison de mesurer des flux supérieurs dans les sols avec FB, en comparaison de la régie témoin avec pailles (0EV-0EF). Il semble donc que les résultats de ce projet confirment ceux précédemment rapportés par Landry et Coll. (2018), soit que le FB incorporé en automne, même relativement tôt (début septembre), produit un pic de production de nitrate lors de la saison suivante et pas dans les semaines suivant son incorporation. Par contre, ce sont les sols avec FB qui présentent la plus grande quantité de nitrate résiduel en automne (strate 0-30 cm), directement liés au risque de lessivage, soit près de 60 % plus que dans les sols témoins, les deux saisons (Tableau 18). La différence entre le nitrate des MEI et résiduel tient au fait que les MEI captent le nitrate qui a effectivement été disponible dans le sol (0-20 cm), tandis que le nitrate résiduel mesure une quantité pouvant être solubilisé si les conditions s'y prêtent. Les sols avec FB présentent donc un risque plus grand de perte de nitrate, même si sur la période de mesure MEI celui-ci n'a pas été réalisé.

Dans le cas des régies avec EV seuls, les flux inférieurs captés les deux années pourraient être attribuables à une immobilisation du N disponible (réorganisation du N) dans la biomasse microbienne dont le développement pourrait être activé par l'apport de C labile des EV. Si tel est le cas, cela signifierait qu'une part du nitrate, hautement lessivable, se retrouve réorganisée sous forme de réserve dans le pool de N organique labile du sol. En absence de mesure du N microbien, cette hypothèse ne peut toutefois pas être validée. Cependant, le fait que les sols avec EV présentent un potentiel de production de nitrate par minéralisation supérieur aux sols témoins lors des incubations de sol réalisées en fin d'automne (Tableau 18), mais pas un contenu en nitrate supérieur, appuie cette hypothèse. Cet effet des EV sur les flux de

nitrate fait en sorte que les sols fertilisés au FB ont des flux de nitrate supérieurs à ceux fertilisés uniquement aux EV, pour une ou plusieurs périodes, avec des différences allant de 1,3 à 2,4 x fois, et ce malgré la présence d'EV dans la régie FB.

Dans le cas des flux de phosphate, l'application de FB entraîne une hausse significative de ceux-ci en comparaison des régies témoins (OEV-OEF avec ou sans paille) en 2019. En 2021, des flux plus élevés tendaient à être captés, mais la différence n'est pas ressortie significative au seuil de $P = 0,05$. L'impact de l'apport des fortes doses de P par le FB ($57-121 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ($25-52 \text{ kg P}$)) semble surtout marqué en fin de saison, avec un flux 4,3 fois supérieur dans les sols avec FB, en comparaison des sols témoins en 2019, et qui tendait à être 1,8 fois supérieur en 2021. Dans le cas des EV et de la paille, dû à la grande variabilité des résultats, il est difficile de cerner un impact. Tel que mentionné précédemment, un effet paille est plus difficile à cerner probablement dû au fait qu'elle a été appliquée en fin d'automne (2019 : 25 sept.; 2021 : 13 oct.), car son impact est majeur en saison sur les flux de nitrate et de phosphate (section 4.3.2).

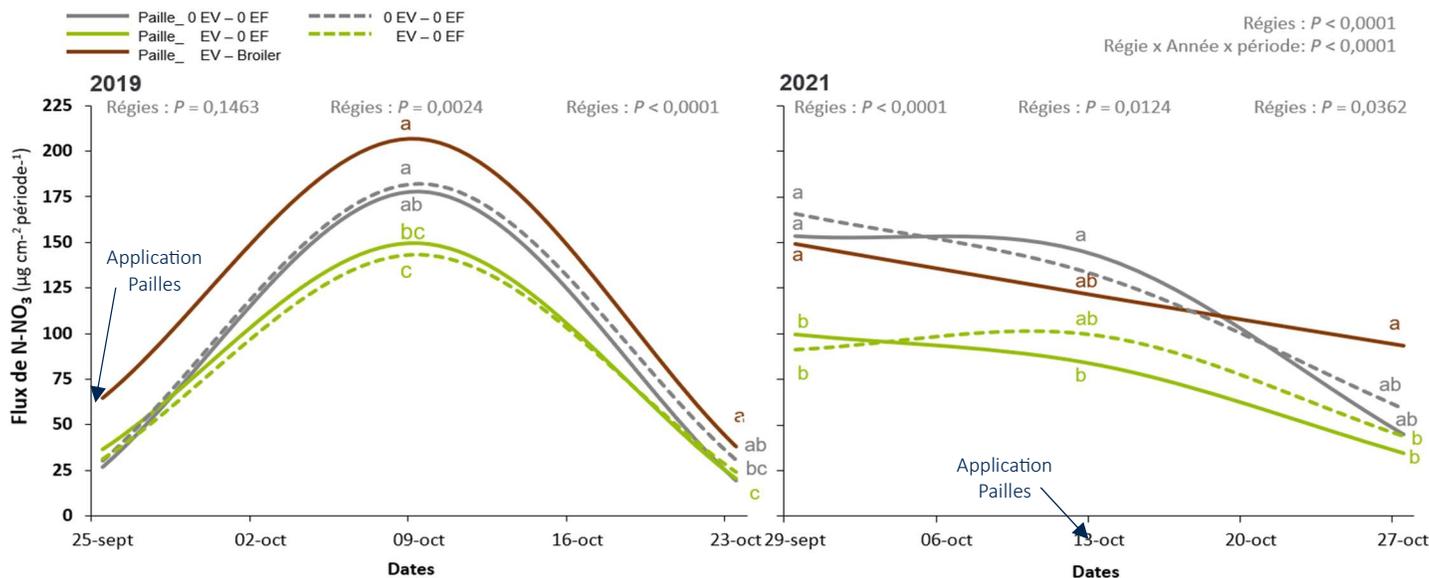


Figure 10. Flux d'ion nitrate dans la couche utile de sol (0-20 cm) en automne 2019 et 2021, à partir de l'application du fumier de « broiler » et de la plantation des caïeux jusqu'aux premiers gels. Les quantités mesurées sont celles accumulées sur chaque période de deux semaines débutant le 10 et 15 septembre, respectivement, en 2019 et 2021. Les lettres distinctives sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

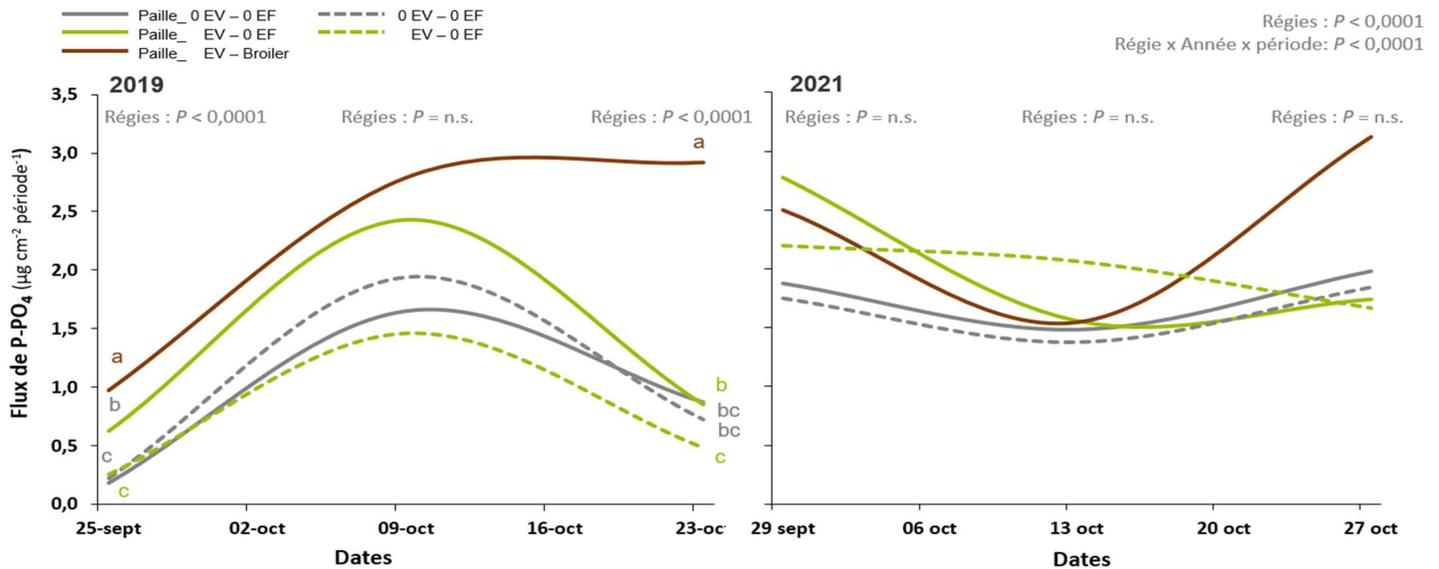


Figure 11. Flux d'ion phosphate dans la couche utile de sol (0-20 cm) en automne 2019 et 2021, suivant l'application du fumier de « broiler » jusqu'aux premiers gels. Les quantités mesurées sont celles accumulées sur chaque période de deux semaines débutant le 10 et 15 septembre, respectivement, en 2019 et 2021. Les lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

Tableau 18. Contenus en N et P disponible et potentiel de minéralisation du N organique des sols (0-20 cm) selon les régies testées, en automne 2019 et 2021.

Régies automnales	2019			2021		
	P soluble à l'eau	N-NO ₃ résiduel	Potentiel de minéralisation du N-NO ₃	P soluble à l'eau	N-NO ₃ résiduel	Potentiel de minéralisation du N-NO ₃
	mg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	mg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Effet Régie	$P = n.s.$	$P = 0,0007$	$P = 0,0127$	$P = n.s.$	$P = 0,0031$	$P = n.s.$
Paille – OEV-OEF	5,1	19 c ¹	10 c	8,9	40 b	22
Sans paille – OEV-OEF	6,3	26 b	18 ab			
Paille – EV-OEF	5,1	22 cb	15 cb	8,7	38 b	28
Sans paille – EV-OEF	5,4	23 cb	20 a			
Paille – EV-Broiler	6,4	36 a	18 ab	8,3	63 a	29

¹ Les lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

² Il n'y a pas de distinction entre paille et sans paille en 2021, car les sols ont été prélevés très peu de temps après la pose de la paille, ainsi celle-ci n'a pas été considérée dans l'analyse des résultats pour cette date.

4.3.2 Saison estivale

Le suivi du N et P disponible du sol par les MEI permet de constater que les flux de nitrate sont beaucoup plus élevés (valeurs principalement entre 10-40 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{période}^{-1}$) que ceux de phosphates (valeurs principalement entre 0,5-2 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{période}^{-1}$). Ceci concorde avec les données de la littérature mentionnant que très peu de P disponible se retrouve en solution du sol (Ziadi et coll. 2001, Shi et coll., 2016) ainsi qu'avec les données très basses de flux de phosphate obtenues dans des projets internes (équipe C. Landry), de l'ordre de 0,01 à 2,3 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{période}^{-1}$. Par ailleurs, les régies ont influencé les flux de ces deux ions dans les sols (Figure 12, Figure 13). Il faut toutefois relativiser les effets sur les flux de phosphate, ceux-ci étant relativement faibles. Il faut aussi relativiser selon les saisons. En effet, l'influence des régies a été plus marquée en 2022, avec des différences significatives pour 6 des 7 périodes, contrairement à 3 des 7 périodes en 2020, tant pour le nitrate que le phosphate. Pour ces deux ions, la paille est de loin le facteur le plus important et son effet est inversé, c.-à-d. que celle-ci hausse les flux de phosphate, mais réduit ceux de nitrate. Dans le cas du nitrate, la dose totale d'apport de

N ressort plus importante que le type de fertilisant, aspect lié au moment d'épandage, ce qui n'est pas le cas pour le phosphate ou un lien direct dose d'apport vs flux n'est pas observé.

Plus en détail, dans le cas des ions nitrate, en présence de paille (T1-T4) tous les flux sont fortement abaissés et équivalents entre en tout temps les deux saisons, peu importe la dose d'apport de N ou le type de fertilisant. La comparaison des flux des régies identiques avec ou sans paille (T1:T5, T2:T6, T4:T7) révèle que la baisse occasionnée par la paille atteint jusqu'à 5 et 13 fois en 2020 et 2022, respectivement (moyenne tout : 2020, 2 fois; 2022, 3,6 fois). Un tel effet pourrait résulter de la fixation par la paille des ions NH_4 contenus dans les EF ou produits en première étape de la minéralisation du N organique, tel qu'observé avec les paillis de bois (Joly-Séguin et coll. 2023) ou les résidus de cultures (Chen et coll. 2021). Ce pourrait également être un effet immobilisant, les microorganismes du sol utilisant le N disponible pour dégrader la paille (Cheshire et coll. 1999, Bhogal et coll. 1997). Dans tous les cas, cela n'est pas dû au fait que les FGP sont demeurées en surface de la paille puisque celle-ci a été tassée le temps d'appliquer et d'incorporer les engrais directement au sol et que le FB et les EV ont été incorporés au sol la saison précédente. Puisqu'une meilleure humidité du sol favorise le déplacement des ions vers les MEI, il était plutôt attendu que la présence de paille maintienne les flux plus élevés et stables dans le temps. Sur ce dernier point, les variations sont, en effets, beaucoup moins grandes dans les sols paillés. En absence de paille (T5 à T8), les régies ont produit des flux atteignant jusqu'à $68 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ période}^{-1}$ ($9 - 68 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ période}^{-1}$). Les flux les plus élevés ne sont pas systématiquement associés aux régies comportant la plus forte proportion d'EF mais à la dose totale de N toutes sources confondues. Ainsi, statistiquement, la régie 100 % FGP (T8 : 0EV-FGP110), ne produit pas des flux supérieurs à la régie EV-FGP60 apportant des doses de N_{eff} de même ordre de grandeur, mais complémentée d'EV (T7), ni en 2020 (T8 = À vs. T7 = À - AB), ni en 2022 (T8 = AB vs. T7 = À). Ceci démontre l'efficacité des EV dans la fertilisation azotée. Cependant, puisque les flux du sol avec EV seul (T6 0Paille-EV-0EF) ne sont pas différents de ceux du sol témoin (T5 0Paille-0EV-0EF) les deux années, l'effet des EV semble davantage indirect et passer par une stimulation de la minéralisation du N organique des EF. Enfin, il est important de noter que cet effet de la paille sur les flux de nitrate ne se répercute pas sur les rendements finaux, que ce soit en termes de quantité que de calibre, les meilleurs rendements n'étant pas nécessairement liés aux flux les plus élevés (Figure 22, Figure 23). Cependant, le suivi du développement racinaire des plants confirme que les MEI étaient positionnées dans la strate de sol exploitée par les racines.

Dans le cas des ions phosphate (Figure 13), les sols de toutes les régies avec pailles présentent des flux plus élevés, en moyenne du double, mais jusqu'à 8 fois plus selon les dates, comparativement à ceux des sols sans paillage. Ainsi, le type et la dose de fertilisant semblent avoir eu pas ou très peu d'effet sur les flux mesurés, même en absence de paillage. En effet, à l'intérieur du groupe des régies avec pailles ou de celui sans paille, les flux ne sont pas statistiquement différents. La seule exception semble être la régie FB-pailles (T3) en 2020. Toutefois, des différences ne sont mesurées que pour 3 des 7 périodes malgré un apport total de P largement supérieur (FB : 121 vs. 30-67 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ pour EV et FGP) (Tableau 12). De plus, pour chacune de ces trois périodes, la valeur moyenne du traitement est en fait haussée par la donnée du bloc 4 qui se détache de façon marquée (plus de deux fois) des trois autres blocs. Sans cette valeur, l'effet du FB devient non significatif. Il a toutefois été décidé de conserver les données du bloc 4 puisque d'une période à l'autre cet effet est constant et « bloqué ». En 2022, les différences d'apports totaux de P étaient moins importantes (FB : 57 vs. 30-74 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ pour EV et FGP) (Tableau 13) et cet effet du FB n'est plus mesuré dans aucune période. Les apports de P étaient plus similaires, car le FB de 2022 contenait davantage de N et moins de P que celui de 2020. À noter que cet effet de la paille sur les flux de phosphate ne se répercute pas sur les rendements finaux, que ce soit en termes de quantité que de calibre (Figure 22, Figure 23).

Les mesures prises en cours de saison ne permettent pas d'expliquer directement cet effet de la paille. Cependant, il faut savoir que le phosphore inorganique (P_i) est rapidement fixé par les particules de sol. Par exemple, selon Tiessen et coll (1984) et Zamuner et coll (2008), près de 80 % des engrais phosphatés solubles appliqués au sol sont rapidement adsorbés (fixés) sur les particules de sol. Des pratiques culturales appropriées telles que la fertilisation, le travail du sol et la gestion

de la paille ont alors des impacts importants et positifs sur la disponibilité du P dans le sol (Pavinato et coll., 2009; Cao et coll., 2021). Il est ainsi reconnu que la fixation P_i est diminuée en présence d'acides organiques ou de P organique labile qui compétitionnent pour les mêmes sites de fixation que le P_i . Les conditions qui augmentent l'activité microbienne des sols contribuent aussi à diminuer la fixation du P. Un tel effet de la paille est documenté dans la littérature scientifique qui rapporte que l'application de celle-ci conjointement avec des engrais phosphatés hausse plus particulièrement les flux de P (tel que le P_i des MEI) (Damon et coll., 2014; Cheng et coll., 2020; Cao et coll 2021; Cao et coll 2022; Guo et coll. 2024). Il serait donc à vérifier si la dégradation de la paille a pu enrichir le sol de ces composés ou hausser l'activité microbienne.

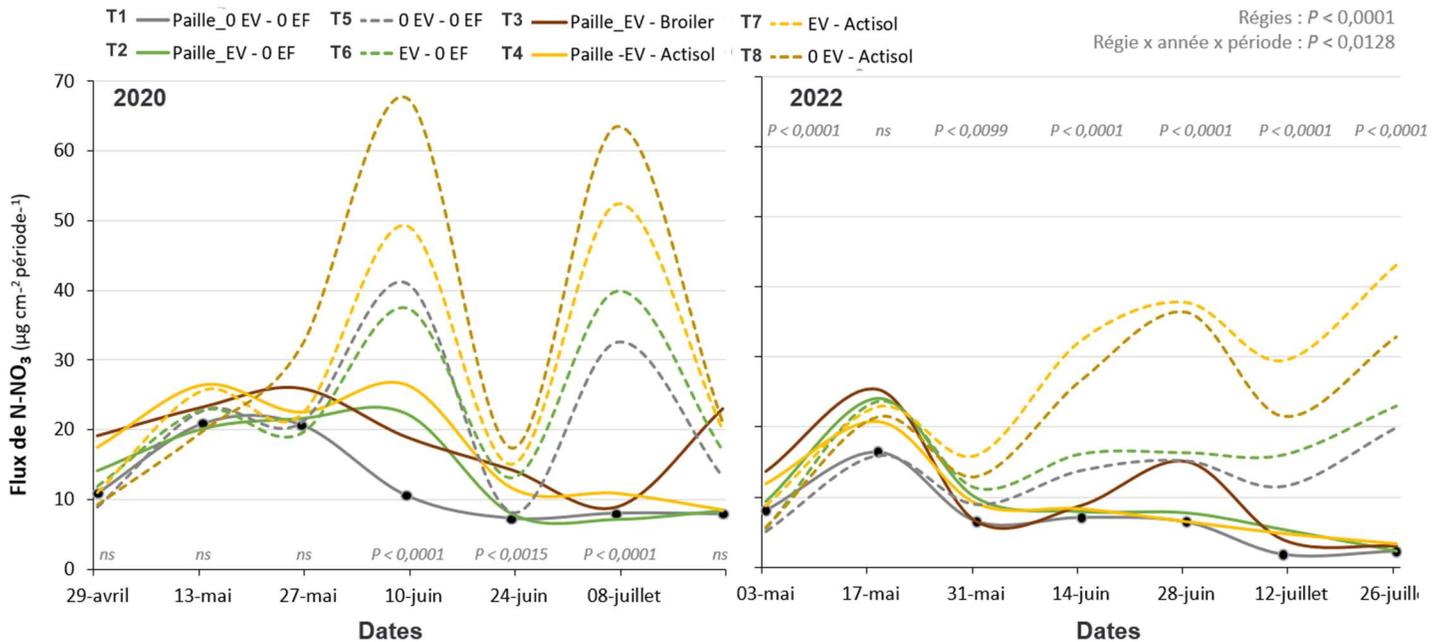


Figure 12. Flux d'ion nitrate dans la couche utile de sol (0-20 cm) selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022.

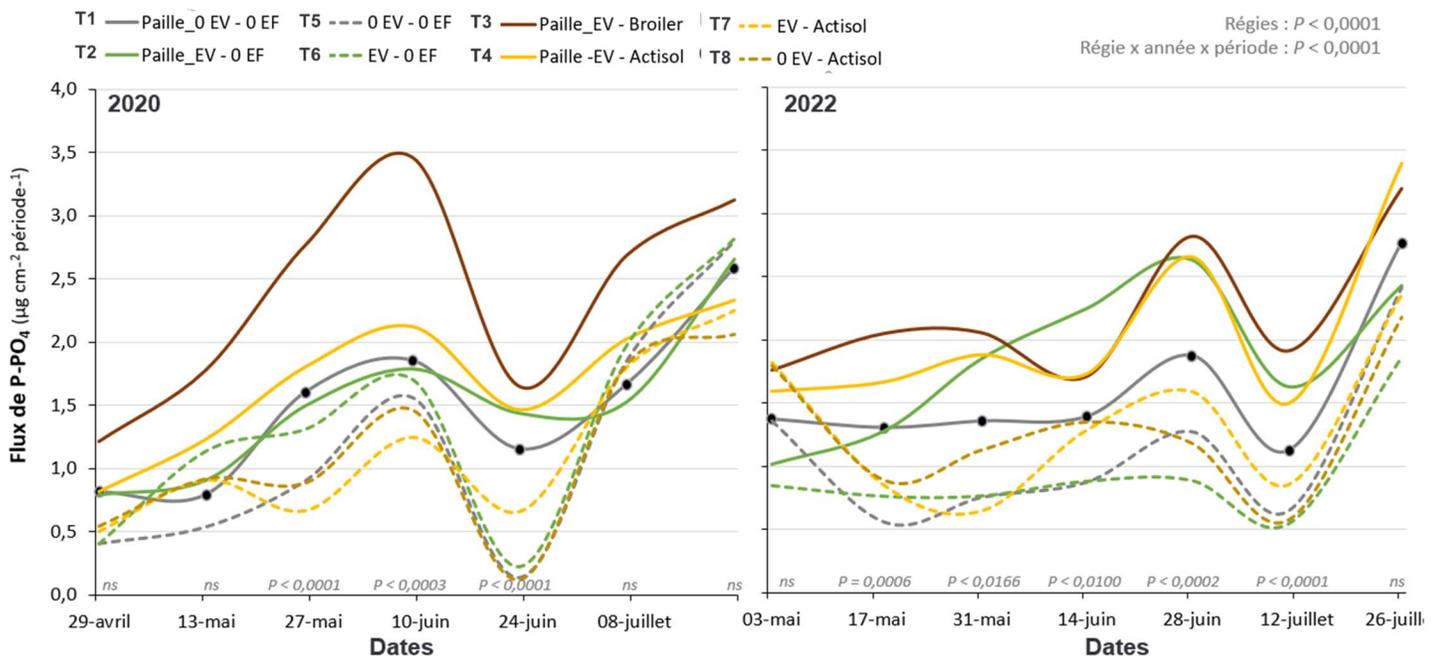


Figure 13. Flux d'ion phosphate dans la couche utile de sol (0-20 cm) selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022.

4.4 DÉVELOPPEMENT ET NUTRITION DES PLANTS

4.4.1 Évolution du développement des plants

Les différentes régies de fertilisation ont eu un impact limité sur le développement des plants d'ail (production de masse sèche (MS) base 100 % sec), (Figure 14 Figure 15). Pour un même type de paillage, il y a eu peu à pas de différence entre les MS des plants aux stades pré-bulbaison et bulbaison. La principale différence, surtout visible à la récolte, a été une MS inférieure d'environ 15 % des plants témoins (0EV-0EF) avec ou sans paille, en comparaison de celles des plants fertilisés. De son côté, le principal impact de la paille a été de décaler la production de MS d'environ 6-7 jours les deux saisons à partir du stade bulbaison. Ainsi, la date de récolte des plants paillés a été retardée d'environ une semaine les deux années. La paille a aussi produit des plants de plus faibles MS au printemps 2020 (pré-bulbaison) probablement parce que celui-ci était beaucoup plus frais qu'en 2022 (Figure 7, Figure 8). Les plants des régies avec paille présentaient alors une masse sèche (MS) 50 % moindre environ, en moyenne, que celles des plants non paillés. Par contre, un tel effet n'était pas présent en 2022, alors que dès la fin avril les températures maximales atteignaient les 20°C, comparativement à la mi-mai en 2020. Ces effets de la paille ne se sont cependant pas répercutés sur les rendements produits (section 4.5). En termes de progression, 6 % et 19 % de la MS étaient produites au stade pré-bulbaison en 2020 et 2022, respectivement. Ceci faisant ressortir une fois de plus l'impact des températures plus froides du printemps de 2020. Au stade bulbaison, l'avance des plants de 2022 était toujours mesurable puisque ceux-ci avaient atteint leur MS maximale, tandis que les plants de 2020 étaient rendus en moyenne à 65 % de leur MS finale. À terme, les MS des meilleures régies étaient en moyenne de 32,1 g plant⁻¹ et de 29,6 g plant⁻¹ en 2020 et 2022, respectivement. Tel que dit précédemment, il ne semble pas y avoir de lien direct entre la MS finale atteinte par les plants des diverses régies et les rendements récoltés. Des régies ayant produit les MS les plus élevées, comme celle avec le FB (2020 et 2022) ou celle du témoin-paille (2022), n'ont pas donné les rendements les plus grands (voir section 4.5).

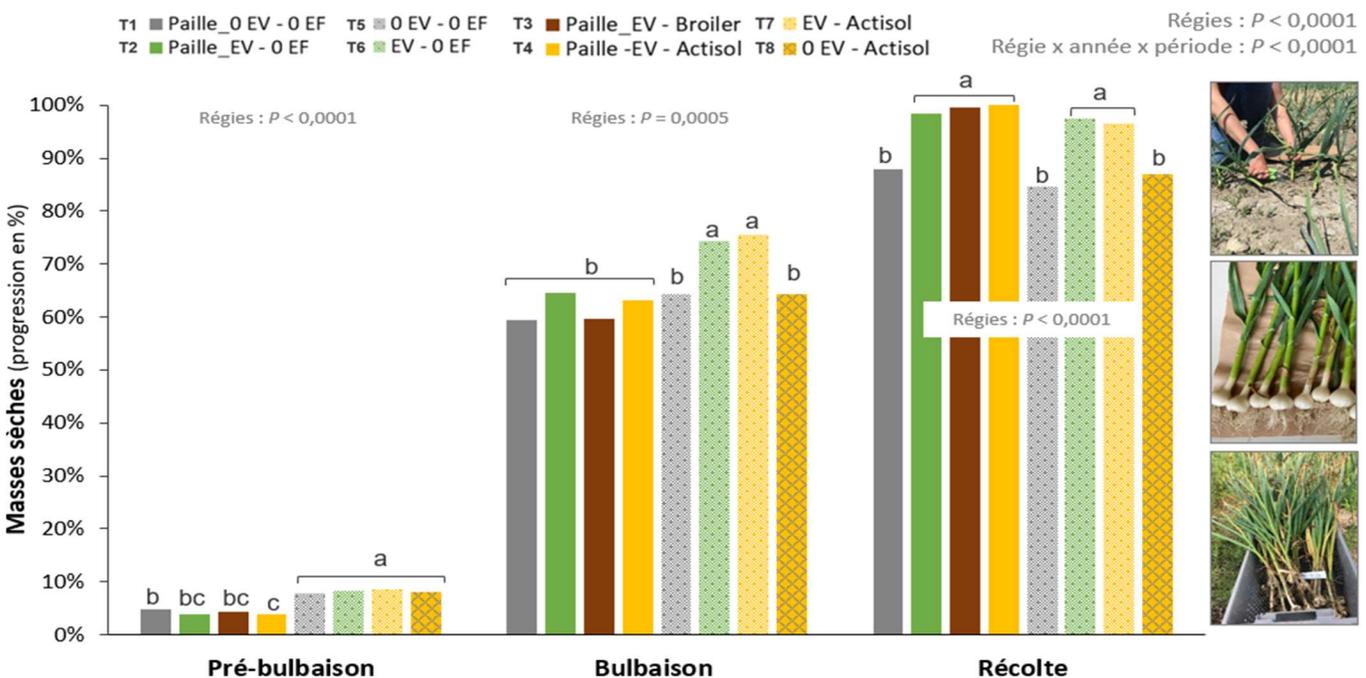


Figure 14. Progression des masses de plants selon les diverses régies testées, été 2020. Les plants des régies avec et sans paille ont été récoltés à la même date au stade pré-bulbaison mais une semaine plus tard aux stades ultérieurs pour les plants paillés. Les masses sont exprimées en proportion de la masse maximale atteinte sur la saison. Les lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

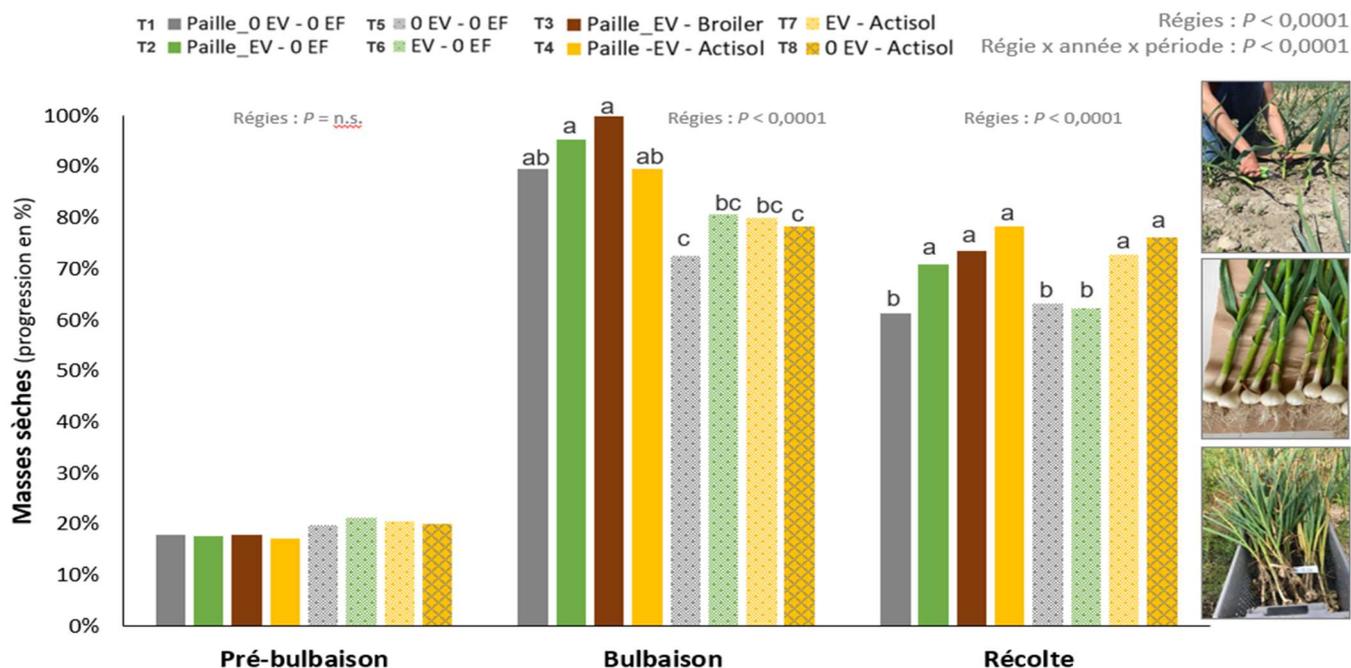


Figure 15. Progression des masses de plants selon les diverses régies testées, été 2022. Les plants des régies avec et sans paille ont été récoltés à la même date au stade pré-bulbaison mais une semaine plus tard aux stades ultérieurs pour les plants paillés. Les masses sont exprimées en proportion de la masse maximale atteinte sur la saison. Les lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

4.4.2 Évolution du prélèvement en éléments majeurs et soufre par les plants

Les Figure 16 à Figure 19 présentent en détail les prélèvements (stade pré-bulbaison : tiges seulement; stades bulbaison et récolte : tiges et bulbes) en éléments majeurs et en soufre en mg plant^{-1} pour chacune de régies à l'étude. Cette mesure se distingue des prélèvements à l'hectare présentés à la section 4.4.3 qui tiennent compte des rendements totaux, modulés par le taux de levée et le déclassé (ex. maladie, éclatement) (prélèvements effectifs pour cette étude). Puisque les prélèvements sont calculés sur la base des MS, celle-ci exerce une forte influence sur les prélèvements. Toutefois, certaines régies peuvent influencer les teneurs en éléments des plants, ce qui entraîne des nuances en comparaison de la progression des MS. D'entrée de jeu, il peut être résumé que la paille et les régies de fertilisation ont des impacts distincts selon l'élément (N-P-K-S). Dans le cas du N, tant la paille que la fertilisation ont un impact important sur les prélèvements, la fertilisation étant le facteur majeur de variation. Pour le phosphore, la paille a un impact, mais moindre que pour l'azote, impact qui se limite surtout aux régies témoins, tandis que la fertilisation n'a pas vraiment d'impact, au contraire du potassium dont les prélèvements sont surtout influencés par la fertilisation. Enfin, pour le soufre, la paille est de loin le facteur majeur qui influence les prélèvements, et ce à tous les stades et années. Rappelons toutefois que les apports étaient relativement élevés et similaires, sauf pour la régie OEV-FGP110.

AZOTE

Au stade pré-bulbaison, en moyenne 15 % (10 à 20 %) et 40 % (30 à 53 %) du prélèvement final était atteints lors des saisons 2020 et 2022, respectivement (Figure 16). Tel que pour la MS, un retard de prélèvement est noté en 2020 pour les traitements sous paillis, en comparaison de 2022, présentant un printemps plus clément. De plus, en 2020, les plants paillés présentent des prélèvements inférieurs au stade pré-bulbaison et cette situation perdure dans le temps. Ainsi, la comparaison de régies de fertilisation identiques avec et sans paille (T1 vs T5; T2 vs T6; T4 vs T7) indique que les plants paillés présentent des prélèvements en N valant 56, 70 et 78 % ceux des plants sans paillis au stade pré-bulbaison, bulbaison et récolte, respectivement. Cette situation s'observe partiellement aussi en 2022, surtout pour les plants des régies témoins OEV-OEF à la récolte (paillis/sans paille = 61 %). Un lien ne peut cependant pas être fait entre cet impact de la paille sur les prélèvements et les rendements produits les deux années puisque les deux saisons, des régies avec paille ont donné des

rendements vendables parmi les meilleurs (Figure 22, Figure 23). Cet effet de la paille concorde cependant avec celui sur les flux de nitrate du sol (Figure 10).

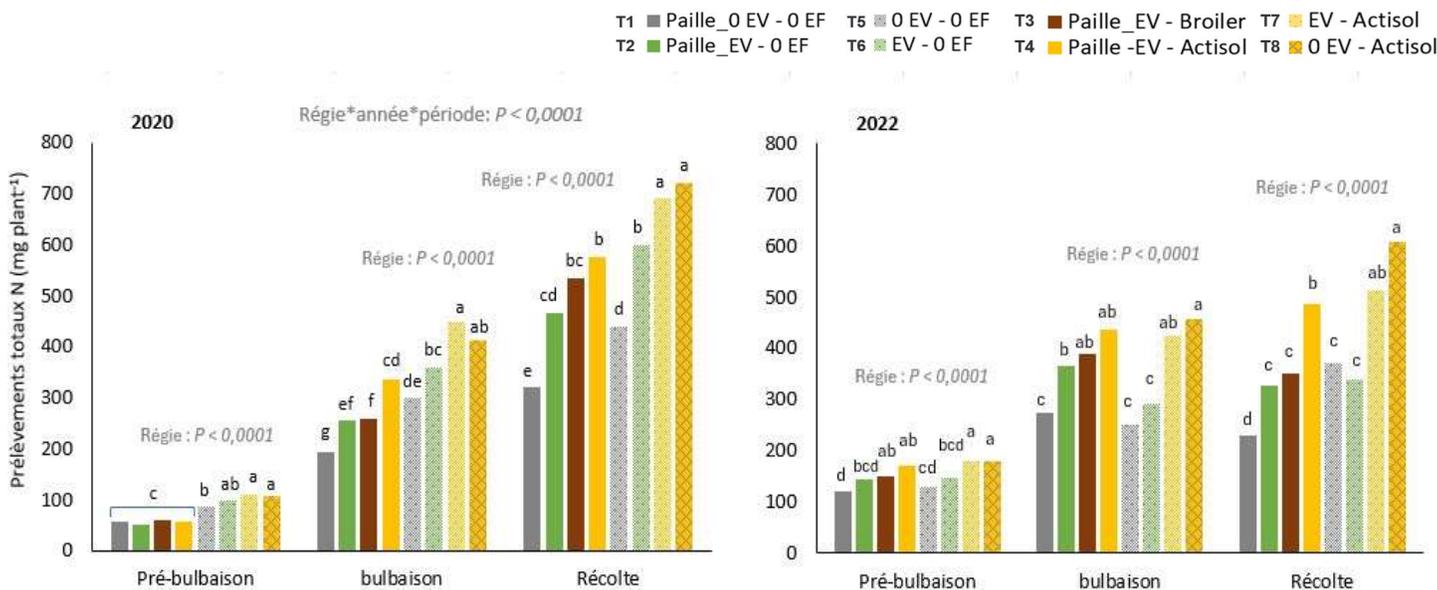


Figure 16. Progression des prélèvements en azote par plant selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022. Les prélèvements sont exprimés en mg par plant. Les lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

PHOSPHORE

Dans le cas du phosphore, une seule mesure de prélèvement était prévue au stade récolte. Toutefois, afin d'avoir davantage de précisions, une mesure a été ajoutée lors de la saison 2022 au stade pré-bulbaison (Figure 17). Il est donc plus difficile de se prononcer sur la progression en saison. Il peut toutefois être dit sur la base des résultats de 2022 qu'environ 20 % du prélèvement total en P était réalisé au stade pré-bulbaison, lors d'une année où les plants démontraient une croissance rapide. La comparaison des régies avec fertilisation identique avec et sans paille indique les deux années que la paille n'a pas entraîné de différence de prélèvement, sauf pour les régies témoins 0EV-0EF (récolte : paille/sans paille = 73 %) et ce, malgré le fait que les flux de phosphore disponibles étaient plus élevés dans les régies sous paillis (section 4.3). Par ailleurs, il aurait pu être pensé que les EF entraînaient des prélèvements en P supérieurs. Toutefois, les deux saisons, certaines régies avec EV seuls ont soutenu des prélèvements statistiquement similaires. Ceci est à l'image des flux de phosphate pour lesquels les EF ont peu haussé statistiquement les valeurs, en comparaison des EV et même des sols témoins pour une même régie de paille.

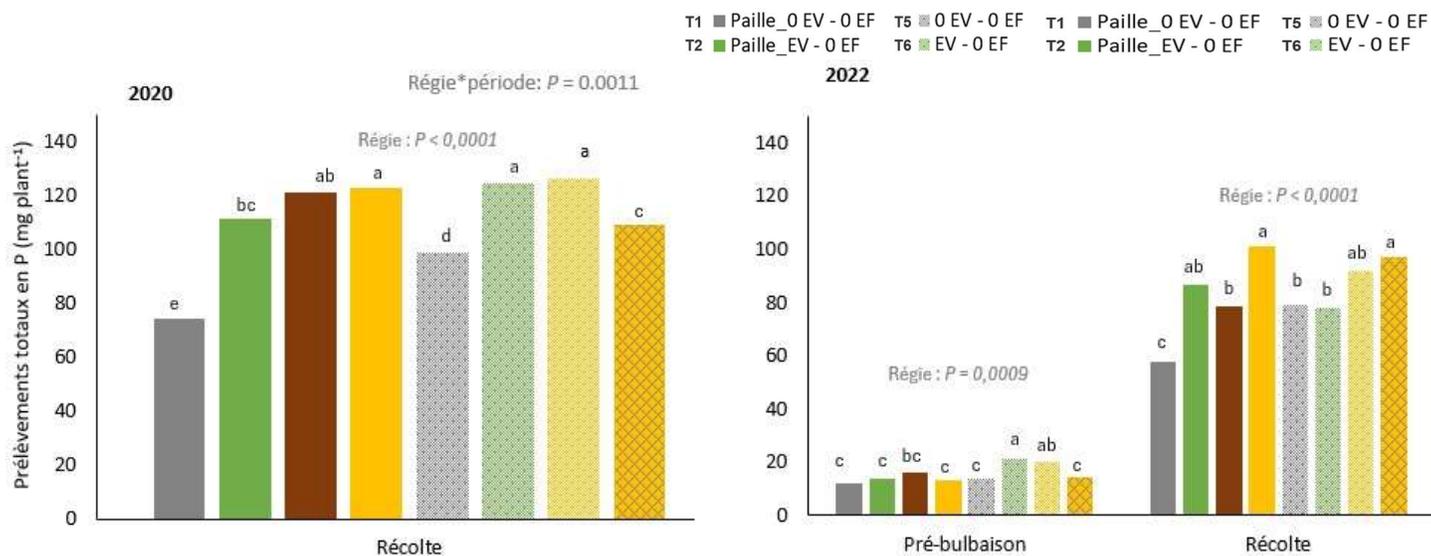


Figure 17. Progression des prélèvements en phosphore par plant selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022. Les prélèvements sont exprimés en mg par plant. Les lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

POTASSIUM

En ce qui a trait au potassium, la paille n'a pas été un facteur ayant un impact significatif sur les prélèvements, contrairement à la régie de fertilisation. Les deux saisons, les plants des régies témoins OEV-OEF sont ceux présentant globalement les prélèvements les plus faibles (Figure 18). Ainsi, les régies avec EV arrivent à soutenir des prélèvements en K statistiquement équivalents à ceux des régies avec apports d'EF, excepté la régie OPaille-EV-OEF de 2022. Une fois de plus, ces résultats plaident pour accroître les connaissances sur la valeur fertilisante en K des EV, pour le moment vus spécifiquement comme des engrais azotés.

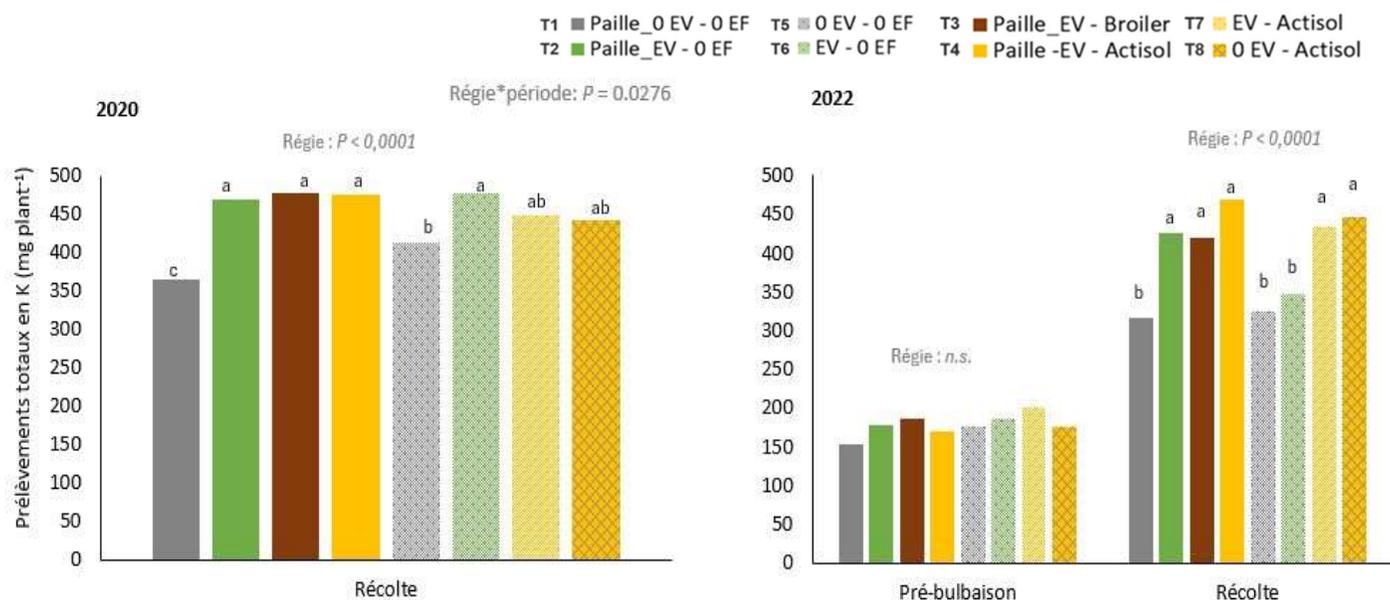


Figure 18. Progression des prélèvements en potassium par plant selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022. Les prélèvements sont exprimés en mg par plant. Les lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

SOUFRE

Pour le soufre, la paille est le facteur déterminant sur les prélèvements, lesquels semblent peu influencés par la régie de fertilisation. La comparaison des régies avec fertilisation identique, avec et sans paille (T1 vs T5; T2 vs T6; T4 vs T7), indique les deux années qu'à tous les stades étudiés, la paille réduit les prélèvements en cet élément (Figure 19). En 2020, à la récolte, les ratios des prélèvements paille/sans paille par type de fertilisation sont de 74 -86 %. En 2022, ces ratios sont de 73 -84 % au stade pré-bulbaison et de 68-85 % à la récolte, sauf la régie avec EV (T2 et T6) pour lesquelles les prélèvements sont égaux. La différence la plus importante les deux années a été obtenue avec les plants des régies témoins 0EV-0EF. Ces résultats de prélèvements concordent avec le fait que ce sont les caïeux des plants paillés qui contiennent le moins de soufre, soit en moyenne 30 % moins (Figure 26). Il serait à valider si cette diminution peut être attribuable à une immobilisation causée par la hausse de l'activité microbienne mesurée sous pailles (Tableau 23).

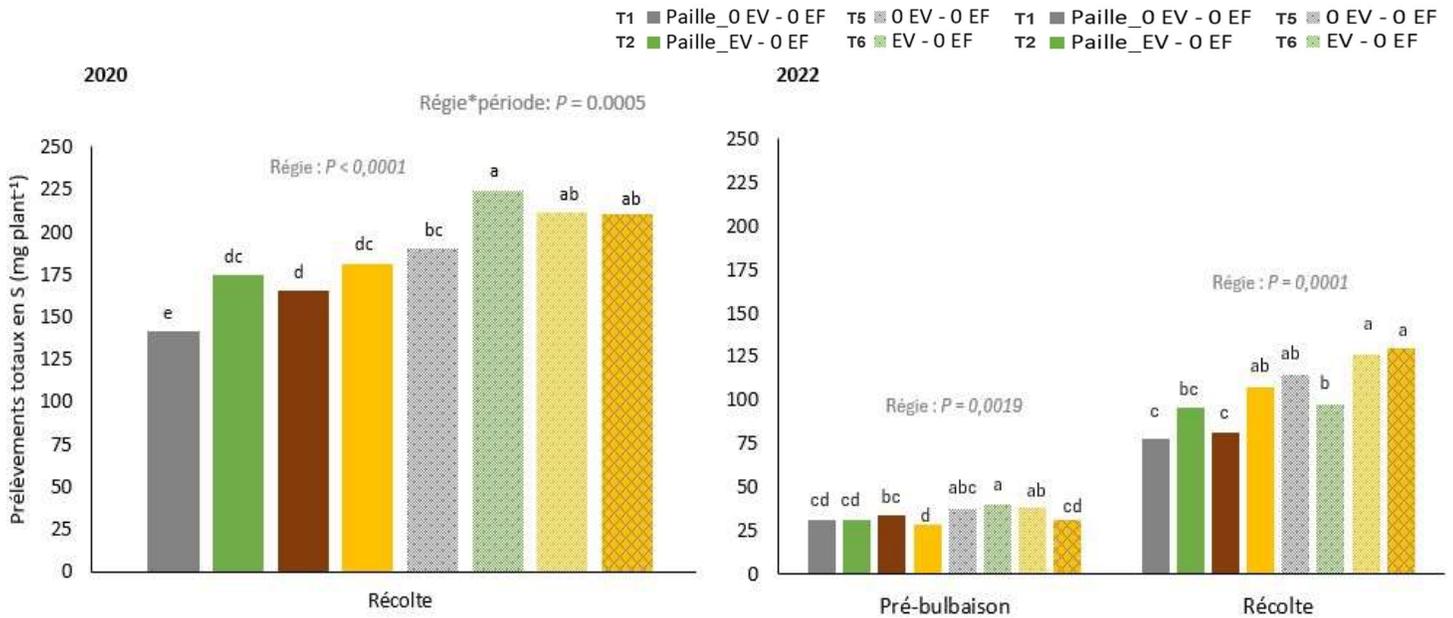


Figure 19. Progression des prélèvements en soufre par plant selon les diverses régies testées, étés 2020 et 2022. Les prélèvements sont exprimés en mg par plant. Les lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

4.4.3 Prélèvements totaux et exportations en éléments majeurs et soufre

Les prélèvements totaux (bulbes et tiges) moyens en éléments majeurs et en soufre, calculés selon le rendement total réel obtenu au champ, sont présentés au Tableau 19. Les prélèvements se sont avérés similaires les deux années pour tous les éléments, bien que les rendements totaux de 2022 aient été environ 25 % inférieurs à ceux de 2020. Seul le prélèvement en S diminue de près de la moitié en 2022. En termes de quantités, en moyenne sur les deux années, l'azote et le potassium sont les éléments les plus prélevés (moy. 2020-22 : 83 kg N ha⁻¹ et 77 kg K₂O ha⁻¹), suivi du soufre (58 kg SO₃ ha⁻¹) et du phosphore (35 kg P₂O₅ ha⁻¹). En proportion, cela représente une relation entre les éléments de 2,4 : 1,0 : 2,2 : 1,7. Dans le cas du soufre, les prélèvements, atteignant 75 kg SO₃ ha⁻¹ en 2020, sont élevés pour un élément mineur. Il s'agit d'une quantité équivalente au prélèvement en potassium. Ceci démontre l'importance du S pour la culture de l'ail et plaide pour améliorer les connaissances à propos de cet élément en contexte québécois de production, en lien avec la fertilisation de la culture.

Tableau 19. Prélèvements¹ totaux en éléments majeurs et soufre, pour les régies ayant obtenu les meilleurs rendements vendables, 2020 et 2022.

Année	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	SO ₃
----- kg ha ⁻¹ -----				
2020	89	39	77	75
2022	76	31	76	41
Moyenne	83	35	77	58

¹ Prélèvements totaux (bulbes et tiges) moyens des régies ayant présenté les meilleurs rendements vendables (a, ab) en tenant compte de la densité réelle au champ et du taux de déclassement (2020 : T6 et T7; 2022 : T4, T7 et T8; voir section 4.5) T4 : Paille-EV-FGP60, T6 : OPaille-EV-OEF, T7 : OPaille-EV-FGP60, T8 : OPaille-OEV-FGP110.

Les prélèvements totaux renseignent sur les besoins nutritionnels de la culture, mais ne correspondent pas aux quantités devant être apportées par fertilisation puisque le sol est en mesure de fournir une part de ceux-ci, qu’une partie des éléments prélevés retourne au sol lors de la récolte et que les besoins sont modifiés selon les conditions annuelles de cultures (richesses des sols, fluctuations annuelles des rendements). Afin d’ajuster la fertilisation, les valeurs d’exportations (Tableau 20), c.-à-d. les quantités d’éléments quittant le site de production (prélèvement des bulbes uniquement dans la présente étude), sont plutôt à considérer, selon le rendement prévu basé sur l’historique du champ. Cette étude révèle que dans le cas des plants d’ail, une forte proportion du prélèvement total est exportée, soit en moyenne sur les deux années 76 % du N, 82 % du P, 50 % du K et 77 % du S. Ainsi, les prélèvements en phosphore sont les moins élevés, mais cet élément quitte le site de production en très forte proportion en comparaison du potassium dont la moitié demeure au site. L’azote et le soufre aussi sont majoritairement exportés. Dans cette étude, en présence de rendements vendables élevés, jusqu’à 70 kg N ha⁻¹ et 59 kg SO₃ ha⁻¹ sont exportés. Ces deux éléments doivent donc faire l’objet d’un bon suivi. Afin de pouvoir personnaliser les exportations selon le rendement produit sur chaque entreprise, les exportations ont également été rapportées par tonne d’ail récolté, toujours pour les régies les plus productives (Tableau 20). Ainsi, en moyenne, chaque tonne d’ail récolté (bulbe avec sa tige) exporte : 11,3 kg N, 5,4 kg P₂O₅, 7,1 kg K₂O et 8,0 kg SO₃. Devant l’importance des exportations en soufre, il serait pertinent de tester dans un projet futur l’impact des apports de soufre sur la teneur en S des bulbes, mais aussi en alliline, composé soufré parmi ceux à l’origine de la saveur et de l’odeur caractéristique de l’ail. À noter que pour le soufre, cette quantité est largement sous le 120 kg SO₃ ha⁻¹ rapporté pour les cultivars français, mais ceci s’explique par les rendements de ces cultivars français dont leur moyenne se situe autour de 6-7 t ha⁻¹ alors qu’au Québec, pour la variété Music, le rendement vendable moyen se situe entre 2,5 et 4,0 t ha⁻¹ (CRAAQ 2020 – Guide ail).

Tableau 20. Exportations en éléments majeurs et en soufre, selon les meilleurs rendements vendables, 2020 et 2022.

Année	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	SO ₃	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	SO ₃
	----- kg ha ⁻¹ -----				----- kg t ⁻¹ ail récolté -----			
2020	70	34	42	59	10,4	5,1	6,2	8,8
2022	55	24	35	31	12,2	5,3	8,0	7,2
Moyenne	60	28	39	45	11,3	5,4	7,1	8,0

¹ Exportations (bulbes seuls) moyennes des régies ayant présenté les meilleurs rendements vendables (a, ab) en tenant compte de la densité réelle au champ et du taux de déclassement (2020 : T6 et T7; 2022 : T4, T7 et T8; voir section 4.5) T4 : Paille-EV-FGP60, T6 : OPaille-EV-OEF, T7 : OPaille-EV-FGP60, T8 : OPaille-OEV-FGP110.

Sur la moyenne des deux saisons, les exportations sont donc de 60, 28 et 39 kg ha⁻¹ pour le N, P₂O₅ et K₂O, respectivement. Ceci correspond à tout près de la moitié des recommandations actuelles en azote, à la borne inférieure de la recommandation en phosphore et à une valeur faible de l’intervalle de recommandation en K (CRAAQ 2010) (Tableau 21). La dose de 60 kg N ha⁻¹ rejoint les conclusions de l’étude de Couture et coll. (2019) qui ont mené des essais au Québec sur la fertilisation de l’ail bio et qui rapportent que les besoins en N seraient aux alentours de 60 kg N_{eff} ha⁻¹. Cette

dose se rapproche davantage des recommandations des grilles de l'état de New York, du Midwest et du Minnesota, que de la grille québécoise (Tableau 1 et Tableau 21). En ce qui a trait au phosphore, avec des contenus du sol aux sites d'essais en P Mehlich-3 de 128 et 247 kg ha⁻¹ en 2019 et 2021, respectivement (Tableau 2), les recommandations québécoises étaient de 140 et de 80 kg P₂O₅ ha⁻¹, ce qui dépasse très largement les valeurs obtenues d'exportations. Ceci pourrait expliquer le peu d'impact des apports de P sur les rendements. Enfin pour le potassium, avec des contenus du sol aux sites d'essais en K Mehlich-3 de 284 et 319 kg ha⁻¹ en 2019 et 2021, respectivement, les recommandations québécoises étaient de 125 et de 95 kg K₂O ha⁻¹, ce qui dépasse aussi grandement les exportations. Cependant, pour ces deux éléments majeurs, l'ensemble des grilles de référence présentent des intervalles dont les valeurs supérieures sont élevées.

Tableau 21. Recommandations d'apport pour l'ail de la grille de référence en fertilisation du Québec des alliacées.

Azote (N)	
Temps et mode d'apport	Recommandations (kg N/ha)
À la volée avant semis	55
En bande lorsque la plante a 15 cm de hauteur	55
Phosphore (P)	
Analyse (kg P _{M-3} /ha)	Recommandation (kg P ₂ O ₅ /ha)
0-50	190
51-100	160
101-150	140
151-200	120
201-300	80
301-400	50
401 et +	30
Potassium (K)	
Analyse (kg K _{M-3} /ha)	Recommandation (kg K ₂ O/ha)
0-100	185
101-200	160
201-300	125
301-400	95
401-500	65
501-600	40
601 et +	20

[Tiré de CRAAQ, 2010, Guide de référence en fertilisation – Ail, Oignon, Poireau]

4.4.4 Analyses foliaires

Dans le cadre de la présente étude, aucune analyse foliaire n'était pas prévue. Toutefois, sur la suggestion de l'agronome associée au projet, la biomasse aérienne des plants au stade pré-bulbaison a été analysée pour les teneurs en éléments majeurs, bore et soufre (Tableau 22). Il ne s'agit donc pas d'un statut nutritionnel normé (stade et partie spécifiques), mais plutôt d'un intervalle de teneurs selon les différentes régions étudiées. Des différences importantes ont ainsi été trouvées pour le N et le P, avec 1,6 et 1,5 fois d'écart entre la teneur minimale et maximale mesurées. À l'opposé, peu d'écarts ont été trouvés entre les teneurs en K et S (1,2 fois). Ceci concorde bien avec le fait que les régions présentaient des différences importantes en apports de N et P, mais pas de K et S (Tableau 10 à Tableau 15 et Tableau 17). La fertilisation semble donc se refléter directement sur les concentrations « foliaires ». En comparaison des normes américaines pour la plus jeune feuille pleinement déployée, les teneurs en N et P sont toutes inférieures (N : 4 %, P : 2000 ppm) et celles en K juste au-dessus (K : 2 %) (UC Davis 2024). Rappelons cependant que ceci est à titre indicatif seulement puisque les conditions de cultures (sol et climat) et les cultivars retrouvés en Californie, sont différents, de même que les tissus analysés. En effet, l'analyse effectuée dans le cadre de notre étude prenait en compte la totalité de la biomasse aérienne, dont la tige, beaucoup moins riche en N et constituant une forte proportion de la biomasse analysée.

Tableau 22. Analyses foliaires au stade pré-bulbaison des plants d'ail, 2022¹.

Traitements	Paille	N %	mg kg ⁻¹					
			P	K	Ca	Mg	B	S
T1	Sans EV - Sans EF	1,7	1699	21796	7055	806	11,9	4395
T2	Avoine-Pois - Sans EF	2,1	2012	25598	8139	942	13,2	4511
T3	Avoine-Pois + FB60	2,1	2215	26101	7665	887	13,4	4763
T4 ²	Avoine-Pois + FGP60	2,5	1909	25207	7572	898	12,7	4104
T5	Sans EV - Sans EF	1,6	1674	21763	7267	889	12,9	4598
T6	Avoine-Pois sans EF	1,7	2536	22045	6954	987	12,3	4725
T7	Avoine-Pois + FGP60	2,2	2481	24413	7711	1048	13,1	4658
T8 ²	Sans EV + FGP110	2,2	1760	21854	8286	1027	13,7	3900

¹ L'ensemble de la biomasse aérienne a été analysée en date du 31 mai (tige et feuille du plant).

² Régies présentant les meilleurs rendements en kg ha⁻¹ en 2022 (T4 : 100 %, T8 : 92 %).

Par ailleurs, en lien avec la productivité, les teneurs en N semblent en lien direct avec les meilleurs rendements vendables (Figure 20, Figure 21). La relation est cependant différente selon les stades de développement et les années. La régression présente aux deux stades des R² plus grands en 2022 qu'en 2021. La proportion de la MS finale atteinte au moment des analyses pourrait expliquer ces différences, les plants de 2020 présentant un délai important sur ceux de 2022 (Figure 14 Figure 15). Il existe ainsi assurément un stade meilleur que les autres pour effectuer cette analyse. En 2022, la MS atteinte donne ainsi le meilleur résultat, tandis que celui-ci s'améliore en 2020 au stade bulbaison. Ainsi, si l'on considère la saison 2022, il existe une relation linéaire étroite de R² = 0,91 et R² = 0,82 en 2020 et 2022, respectivement, entre la teneur en N des plants et le rendement final. Sinon, sur les deux années au stade bulbaison, il existe une relation linéaire de R² = 0,43 et R² = 0,82 en 2020 et 2022, respectivement, entre la teneur en N des plants et le rendement final. Ces résultats appuient la pertinence de conduire des recherches (stades, seuils) afin de doter le Québec de normes foliaires de statut nutritionnel. Ces normes pourraient ainsi devenir un outil de gestion de la fertilisation azotée et supporter l'agronome dans ses décisions d'apport. Pour le P, le K et le S, aucun lien direct n'est ressorti. Les plants des meilleurs rendements présentant des teneurs intermédiaires et pas nécessairement similaires. Toutefois, l'analyse recommandée de la plus jeune feuille pleinement déployée sur laquelle repose habituellement les analyses foliaires aurait peut-être permis de voir un lien.

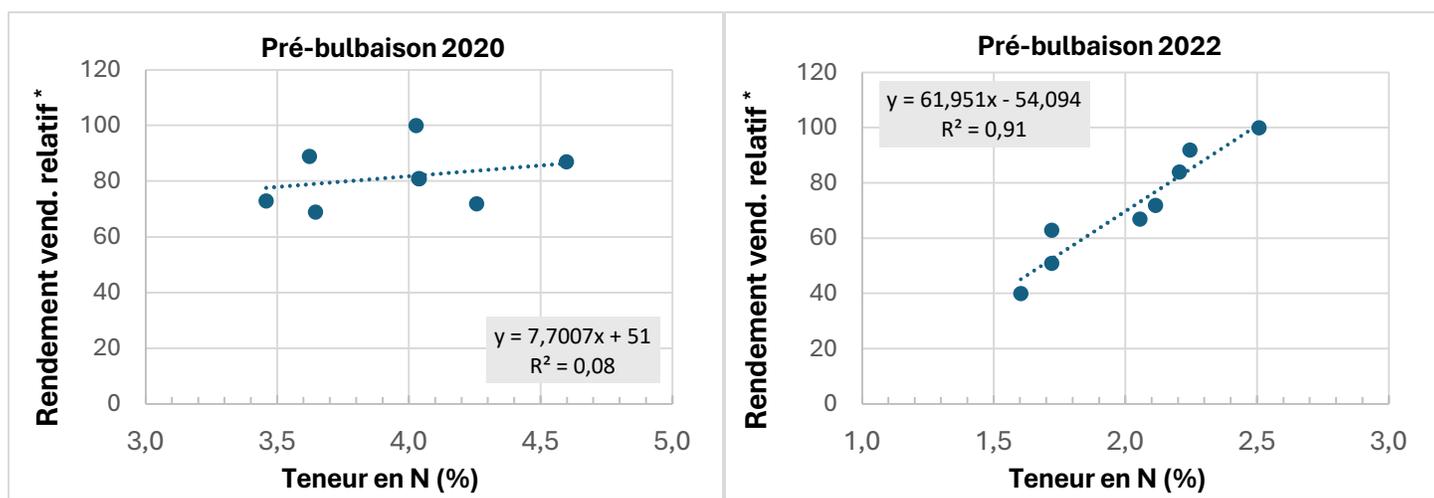


Figure 20. Relation entre la teneur foliaire en azote des plants d'ail au stade pré-bulbaison et le rendement vendable*, saisons 2020 et 2022. * Le rendement vendable en kg ha⁻¹ à 53 % d'humidité est exprimé en proportion du meilleur rendement produit.

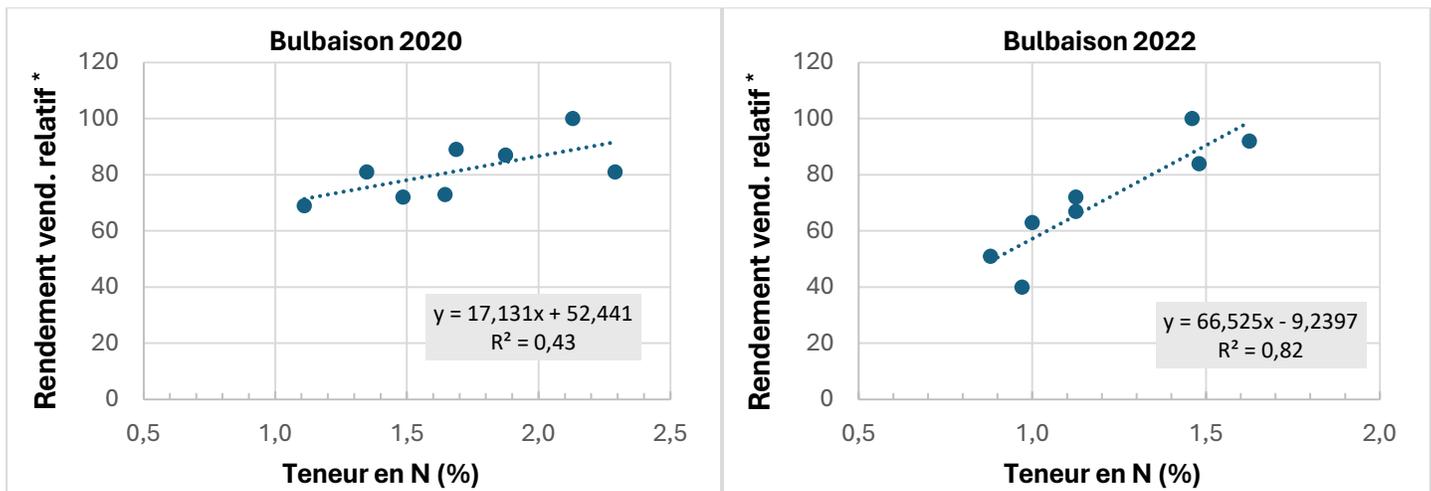


Figure 21. Relation entre la teneur foliaire en azote des plants d’ail (partie aérienne) au stade bulbaison et le rendement vendable*, saisons 2021 et 2022. * Le rendement vendable en kg ha⁻¹ à 53 % d’humidité est exprimé en proportion du meilleur rendement produit.

4.5 RENDEMENTS ET QUALITÉ DE LA RÉCOLTE

Bien que les deux années aient été marquées par des conditions météorologiques contrastées (section 4.1.1), les constats sur les rendements et la qualité restent similaires. Les rendements sont présentés sur la base des rendements vendables après séchage (53% hum) exprimé en kg ha⁻¹ et en g plant⁻¹ (Figure 22, Figure 23). Les premiers prennent en compte le taux de levée et la densité de plantation du site qui sont des paramètres année et site spécifiques. Il a donc été jugé pertinent de présenter également le rendement par plant afin de faciliter les comparaisons entre entreprises et années. De plus, comme il ne ressort pas de lien entre la présence ou non de paille et le rendement produit en termes de quantité, l’impact de la paille est discuté dans la section suivante sur la qualité.

4.5.1 Rendements

En termes de rendements hectare, une forte réponse à la fertilisation a été mesurée les deux années (2020 : ≥ 39%; 2022 : ≥ 60%), ce qui permet de réaliser l’objectif premier du projet, soit de comparer les régies de fertilisation, même en 2020, car si les données indiquent que les besoins en N à combler étaient moins grands (conditions pédoclimatiques favorables à la nutrition N), les apports azotés étaient quand même essentiels pour atteindre les meilleurs rendements avec un gain demeurant très significatif de 39 %, en comparaison du plus faible rendement produit. Ainsi, dans un contexte moins exigeant en N (2020), les meilleurs rendements sont obtenus avec des régies qui incluent des EV et qui apportent moins N_{eff} que la régie 0EV-FGP 110, incluant la régie EV seul sans paille (Figure 22) (T7 = T6 ≥ T4 ≥ T2) n’apportant que 35 kg N_{eff} ha⁻¹. Cependant, dans un contexte plus exigeant (2022), les apports par EV, très réduits (30 kg N_{eff} ha⁻¹), s’avèrent insuffisants, avec une perte importante de rendement. Les régies avec EV seuls font cependant tout de même mieux que les régies témoins (Figure 23). Ainsi, le contexte de production de 2022 permet d’observer le potentiel azoté des EV soutenant la production de 5,6 g plant⁻¹ de plus que le plus faible rendement (régie 0Paille-0EV-0EF) (39,4 vs. 33,8 g plant⁻¹). De plus, il n’y a encore une fois pas de gain à apporter la plus forte dose de N sous forme d’EF (110N). En effet, la régie mixte EV-FGP60 paillée permet un rendement équivalent, bien que la dose totale d’apport de N_{eff} soit réduite de 18 % et apportée sous forme d’EV pour le tiers de la dose. Ainsi, les régies mixtes EV-FGP60 (T4 et T7) permettent un rendement meilleur ou équivalent à la régie 0Paille-0EV-FGP110 (T8) les deux années. Ceci confirme la nécessité d’établir des essais de fertilisation azotée pour cette culture, non seulement parce que la dose recommandée de 110 N apparaît plus élevée que nécessaire, mais également parce que le besoin diffère selon les sites, indiquant l’intérêt de rechercher des indicateurs de fertilité des sols, en plus des doses optimales de fertilisation. Enfin, l’apport au printemps d’un EF de nature labile, le FGP, apparaît une stratégie gagnante en termes de productivité, en comparaison de l’apport automnal d’EF plus résistant à la dégradation (voir section 4.2). Ainsi, les deux années, le meilleur rendement est toujours produit avec une régie d’application de FGP au

printemps, tandis que l'apport de FB en automne présente une productivité 30 % inférieure, s'approchant ou équivalent aux rendements des régies témoins sans fertilisation azotée. Si l'on considère les trois meilleurs rendements de chaque année, les régies avec FGP en produisent 2/3 en 2020 et 3/3 en 2022. L'intensité de production de nitrate au printemps semble donc déterminante. En effet, malgré un apport en N_{eff} plus élevé (et en N_{total} très supérieur) les deux années (Tableau 10, Tableau 11), la régie avec FB sous-performe en comparaison des régies avec FGP.

Puisque dans ce projet, la paille a été tassée le temps d'appliquer les FGP, puis remise en place, la performance de la régie EV-FGP60 pose la question de la faisabilité d'application des FGP directement sur la paille. À ce sujet, suivant la fin du présent projet, un projet pilote a été mené (PADAAR N° 7392510) à l'été 2023 afin de tester à grande échelle sur plusieurs entreprises l'application printanière de FGP sur la paille (voir Landry et coll. 2023). Cette étude pilote indique que l'application sur paille n'a pas entraîné d'impact négatif sur les rendements, mais a plutôt contribué à les hausser, de même que le calibre des bulbes et le poids des caïeux, et cela d'autant plus que la proportion de N appliquée au printemps était élevée.

La considération des rendements en g plant^{-1} ne modifie pas les constats réalisés sur les diverses régies. Les régies de printemps avec dose réduite de FGP60 (T4 et T7), avec ou sans paille, permettent toutes les deux l'atteinte du plus haut rendement, même en contexte exigeant en fertilisation N (2022). Les rendements produits sont de 51,6 et 48,3 g plant^{-1} en 2020 et 2022, respectivement. À l'opposé, la régie avec FB ne produit que 46,5 et 39,4 g plant^{-1} en 2020 et 2022, respectivement. Selon les saisons, ces rendements sont les mêmes que ceux de certaines régies avec EV seuls ou témoins non fertilisées. La perte de rendement avec application automnale de FB, en comparaison de l'application printanière de FGP est donc particulièrement importante en contexte exigeant en fertilisation N (2022) (48,3vs. 39,4 g plant^{-1}).

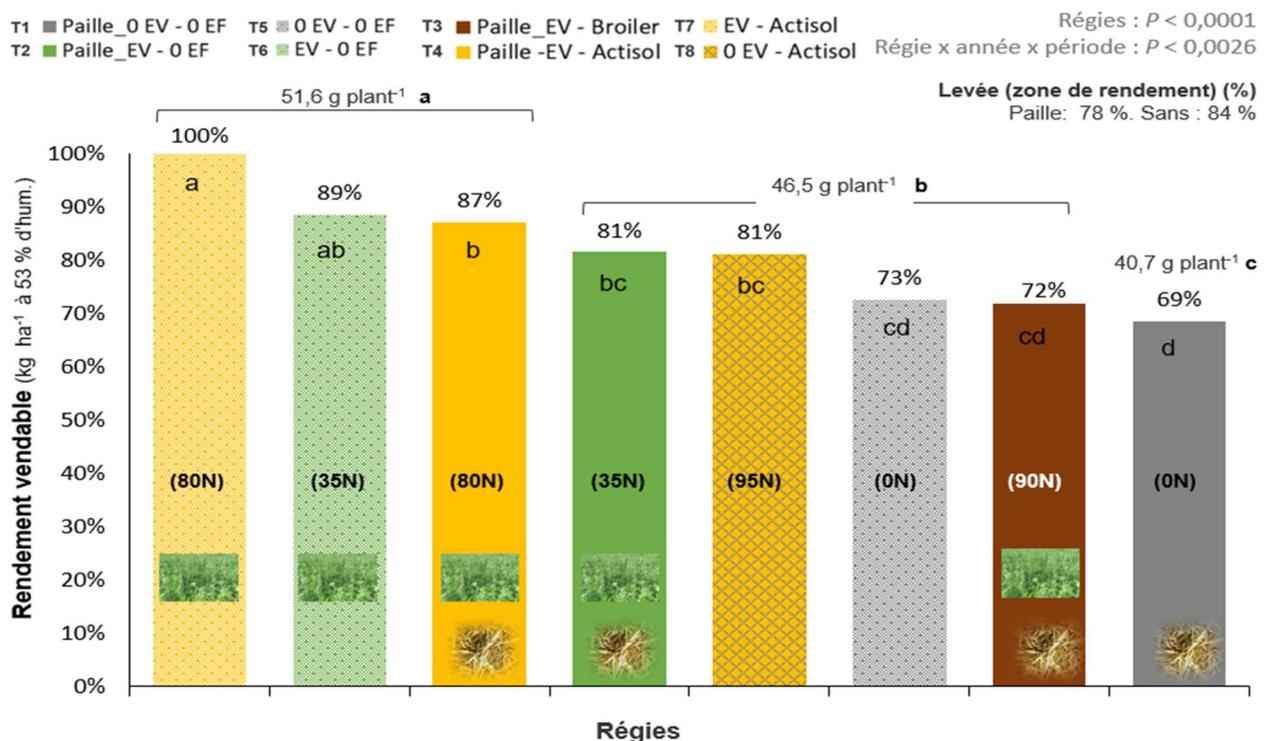


Figure 22. Rendements vendables en bulbes produits selon les diverses régies testées en proportion du meilleur rendement atteint, été 2020. Les nombres entre parenthèses sur les barres d'histogrammes indiquent les quantités de N apportées selon les divers engrais (EV, FB ou FGP). Le rendement en kg ha^{-1} est exprimé en proportion du meilleur rendement produit, tandis que les rendements produits par plant sont inscrits en g plant^{-1} en haut de figure. Les régies regroupées sous la même parenthèse présentent des rendements par plant non statistiquement différents. Les régies identifiées avec des lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

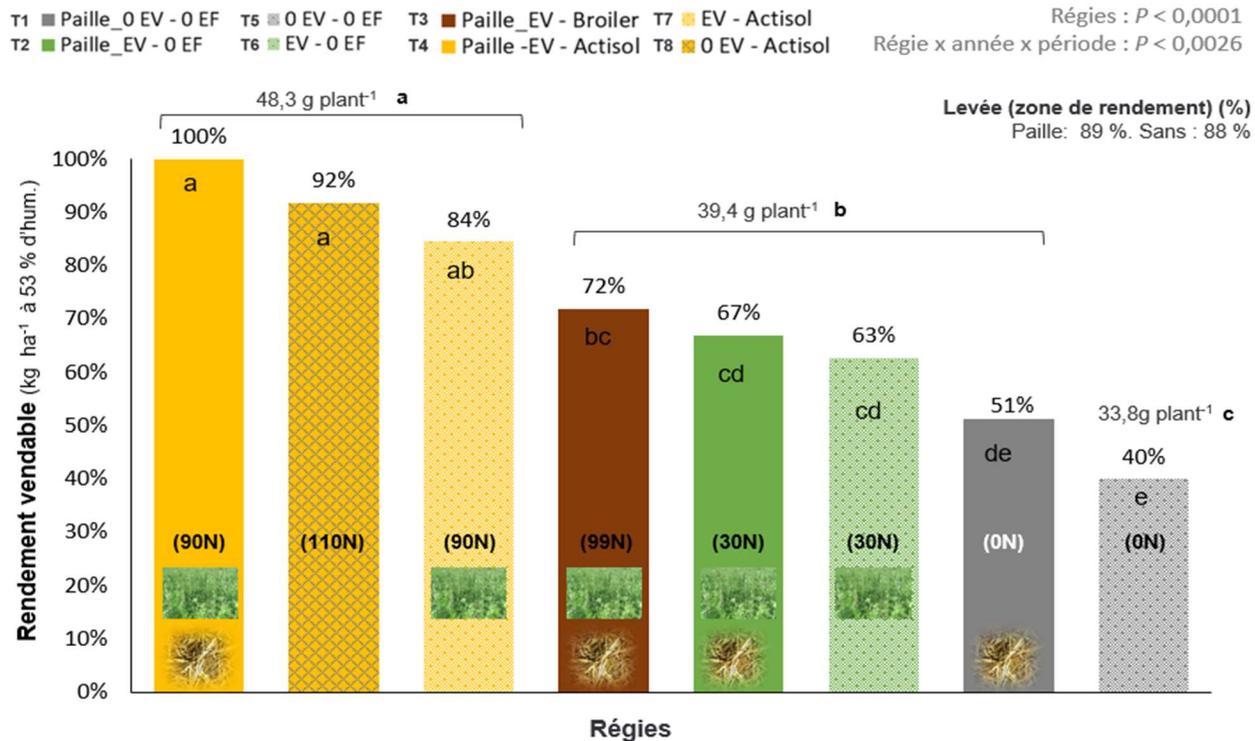


Figure 23. Rendements vendables en bulbes produits selon les diverses régies testées en proportion du meilleur rendement atteint, été 2022. Les nombres entre parenthèses sur les barres d’histogrammes indiquent les quantités de N apportées selon les divers engrais (EV, FB ou FGP). Le rendement en kg ha⁻¹ est exprimé en proportion du meilleur rendement produit, tandis que les rendements produits par plant sont inscrits en g plant⁻¹ en haut de figure. Les régies regroupées sous la même parenthèse présentent des rendements par plant non statistiquement différents. Les régies identifiées avec des lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

4.5.2 Qualité

En termes de qualité, la fertilisation azotée a fortement influencé le calibre des bulbes, tandis que le paillage a modifié le poids des caïeux et leur teneur en soufre.

Ainsi, avec ou sans paille, les plants ayant bénéficié d’une meilleure fertilisation azotée ont présenté une plus forte proportion de plus gros calibre (Figure 24). Par exemple, l’écart est majeur entre le calibre des régies témoins, ayant 3- 32 % de gros calibre (> 51 g), comparativement à 43-70 % pour les régies EV-FGP60. Les régies EV-FGP60 ressortent donc comme le meilleur choix pour les calibres, tout comme pour le rendement en lui-même, puisque les deux années, quel que soit le paillage, elles produisent la plus forte proportion de gros calibre et très peu de bulbes < 30 g. À l’opposé, la régie avec FB (T3 : Paille-EV-FB) produit une proportion des divers calibres identique à la régie n’utilisant que des EV (T2 : Paille-EV-OEF).

En ce qui a trait au poids des caïeux, le paillage apporte un net avantage. Les régies paillées présentent des bulbes avec statistiquement moins de caïeux, soit 40 et 15 % moins en 2020 et 2022, respectivement. Conséquemment, puisque la paille n’abaisse pas le rendement produit, le poids moyen de chacun des caïeux s’en retrouve augmenté (Figure 25), et cela quelle que soit la fertilisation N. Cela se produit donc tout autant avec les plants non fertilisés des régies témoins OEV-OEF (T1 et T5), qu’avec la fertilisation la plus productive EV-FGP60 (T4 et T7). Il est à noter que l’écart de poids semble davantage lié à la saison qu’à la régie. Par exemple, en 2020, l’écart de poids selon le paillage pour les régies de fertilisation identiques (T1 vs T4, T2 vs T6, T4 vs T7) est d’environ 30 %, et d’environ 15 % en 2022.

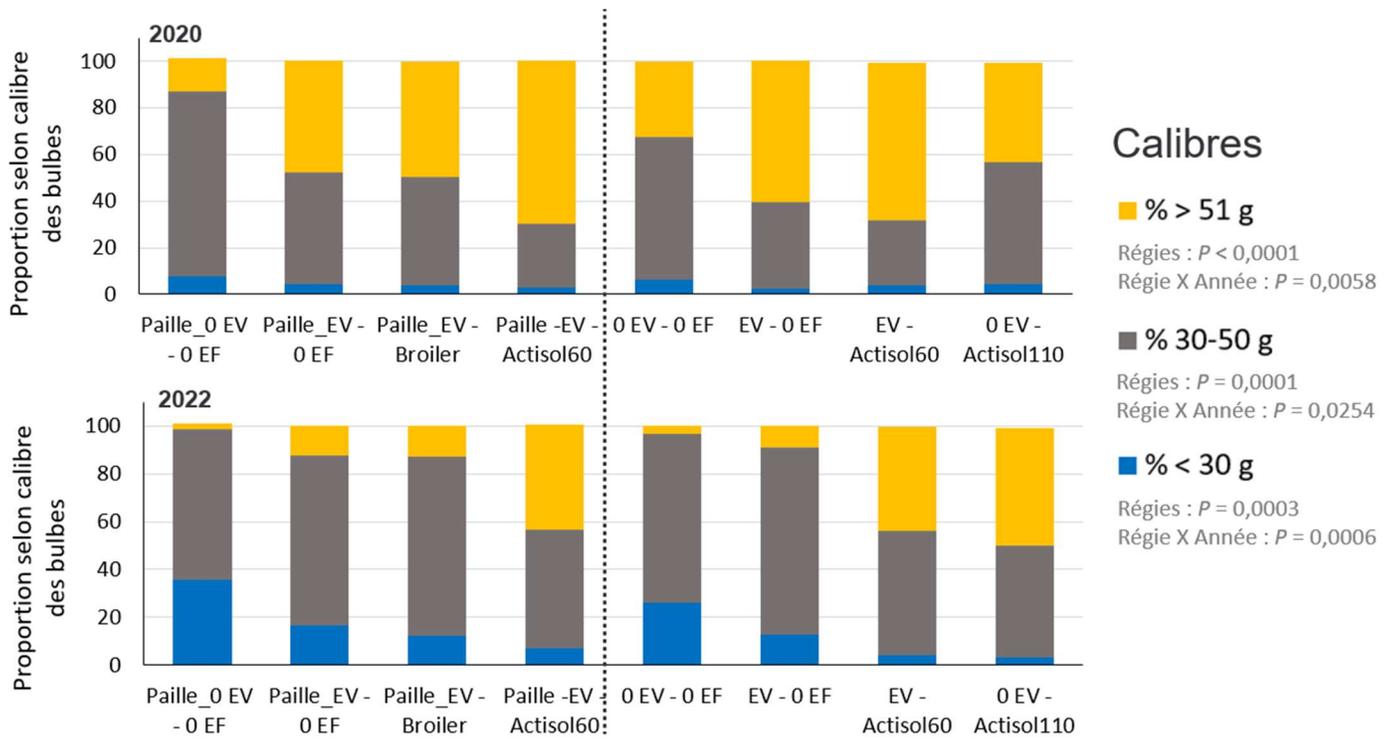


Figure 24. Proportion de chacun des calibres des rendements vendables selon les diverses régions testées, récoltes 2020 et 2022.

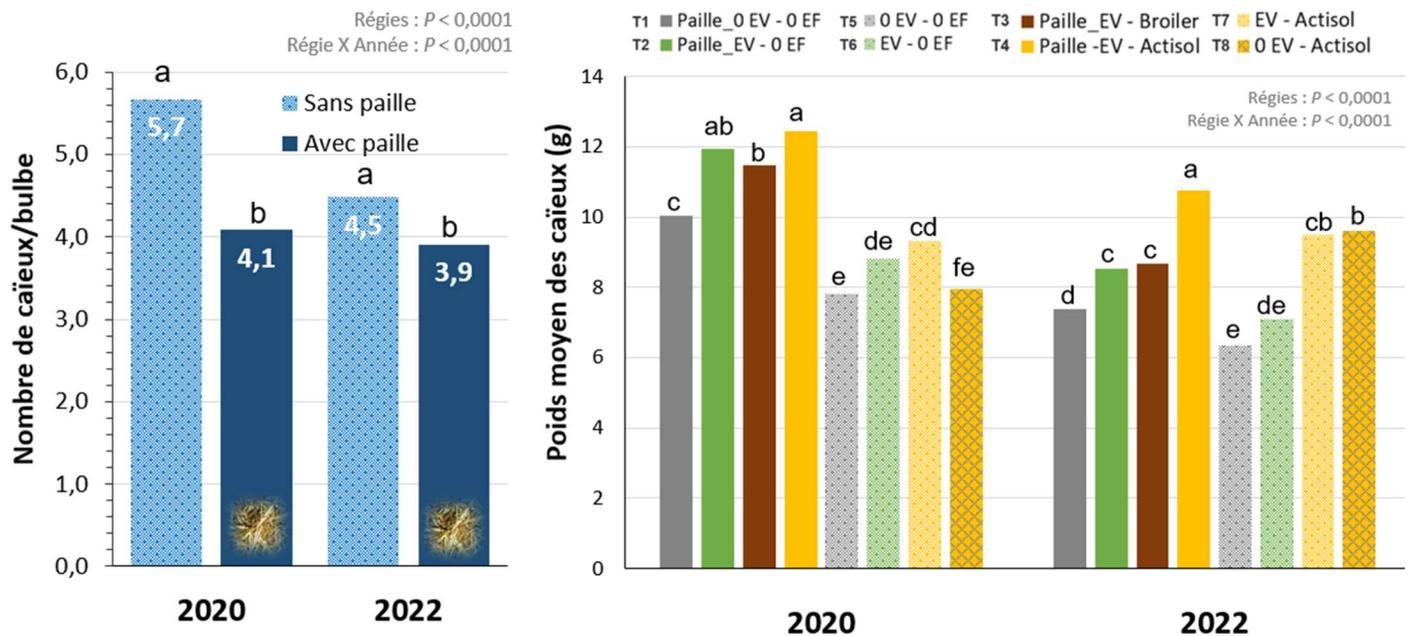


Figure 25. Nombre de caïeux par bulbe et poids moyen des caïeux selon les diverses régions testées, récoltes 2020 et 2022. Les régions identifiées avec des lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

Enfin, un des aspects les moins attendus du paillage est son impact sur la teneur en S des caïeux (Figure 26). Ainsi, la région de fertilisation n'a pas été déterminante sur cette variable bien que la nature des produits et les périodes d'apports aient été différentes, et cela quelle que soit la dose de S apportée (Tableau 16, Tableau 17). De plus, en moyenne, la différence entre les plants paillés ou non est similaire les deux années. En 2020, la teneur moyenne en S des caïeux est donc de 0,54 % pour les plants paillés (régions T1 à T4), contre 0,72 % pour les plants sans paille (régions T5 à T8), soit 1,34 fois plus. En

2022, cette différence est de 1,29. Il appert donc qu'en général les plants paillés produisent des caïeux 1,3 fois plus concentrés en S que les plants non paillés. Cet effet de la paille serait à explorer dans un futur projet. Il serait intéressant, par exemple, de savoir s'il passe par l'impact de la paille sur le développement des caïeux ou sur la dynamique dans le sol de l'ion SO_4 , à l'image des flux modifiés de PO_4 qui est également un ion négativement chargé.

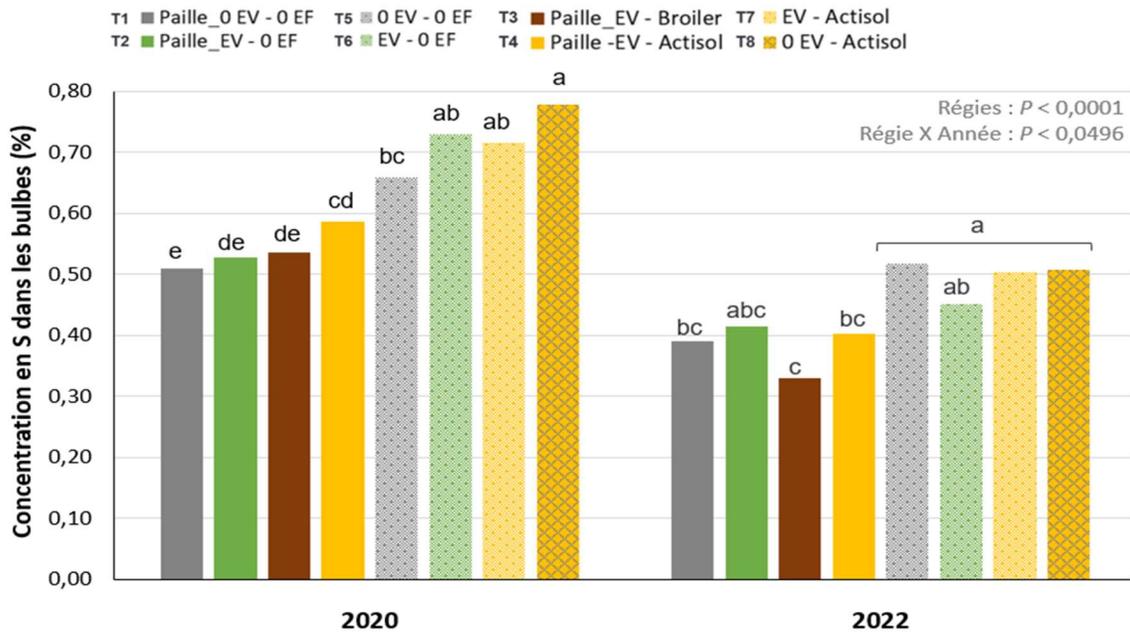


Figure 26. Concentration en soufre des caïeux selon les diverses régies testées, saisons 2020 et 2022. Les lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

4.6 DÉCLASSEMENT, ÉTAT PHYTOSANITAIRE ET CONSERVATION DES BULBES D'AIL

4.6.1 Déclassement et état phytosanitaire des bulbes sains

DÉCLASSEMENT

Le pourcentage de bulbes déclassés est présenté à la Figure 27. **Proportion de bulbes déclassés selon les diverses régies testées, récoltes 2020 et 2022.** Les régies identifiées avec des lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$. En 2020, pratiquement tous les bulbes récoltés étaient d'apparence saine et aucune différence significative n'a été obtenue entre les huit régies testées. Cependant, en 2022, les conditions humides étant très propices au développement de maladies, davantage de bulbes ont été écartés du rendement commercialisable. Dans ce contexte, la régie de fertilisation a eu un impact sur le taux de déclassement, tandis que la présence ou non de paille n'a pas eu d'effet. Ainsi, les plants dont la fertilisation N était supérieure (régies avec EF) ont eu en moyenne 23 % de bulbes déclassés (maladie ou autres causes de rejet), comparativement à 43 % pour les régies témoin 0EV-EF, les régies avec EV seuls présentant de valeurs intermédiaires. Un effet de la paille aurait pu être attendu vu l'influence de celle-ci sur la température et l'humidité du sol, que ce soit un effet protecteur en 2020 pendant la canicule ou aggravant en 2022 vu les pluies régulières. À cet effet, les agronomes terrains spécialisés dans la culture de l'ail avaient déjà remarqué certaines années que l'incidence des maladies fongiques (*Botrytis sp.*) en saison semblait moindre lorsqu'il y avait de la paille (Legault G., communication personnelle). Les hypothèses alors soulevées pour expliquer le phénomène étaient les suivantes : le sarclage mécanique utilisé pour détruire les adventices en absence de paille serait un vecteur de propagation de la maladie; la machinerie utilisée pour sarcler causerait des blessures aux plants, créant des portes d'entrée pour la maladie; la paille réduirait les « éclaboussures » lors d'épisodes de pluie, ce qui diminue la propagation des maladies; la paille permettrait une meilleure infiltration de l'eau dans le sol, laquelle reste moins en surface et permet de réduire l'humidité favorable au développement de maladies.

Cependant, malgré une tendance pour certains traitements, aucun effet statistique de la paille n'a été noté. La fertilisation azotée a donc été le principal facteur et a fortement influencé le pourcentage de bulbes déclassés dans un contexte météorologique propice aux maladies, à un site présentant une forte réponse à la fertilisation N. Les principales causes de déclasserement ont été un calibre inférieur à 20 g, l'éclatement des bulbes ainsi que la présence de moisissures ou taches sur les bulbes (Figure 28).

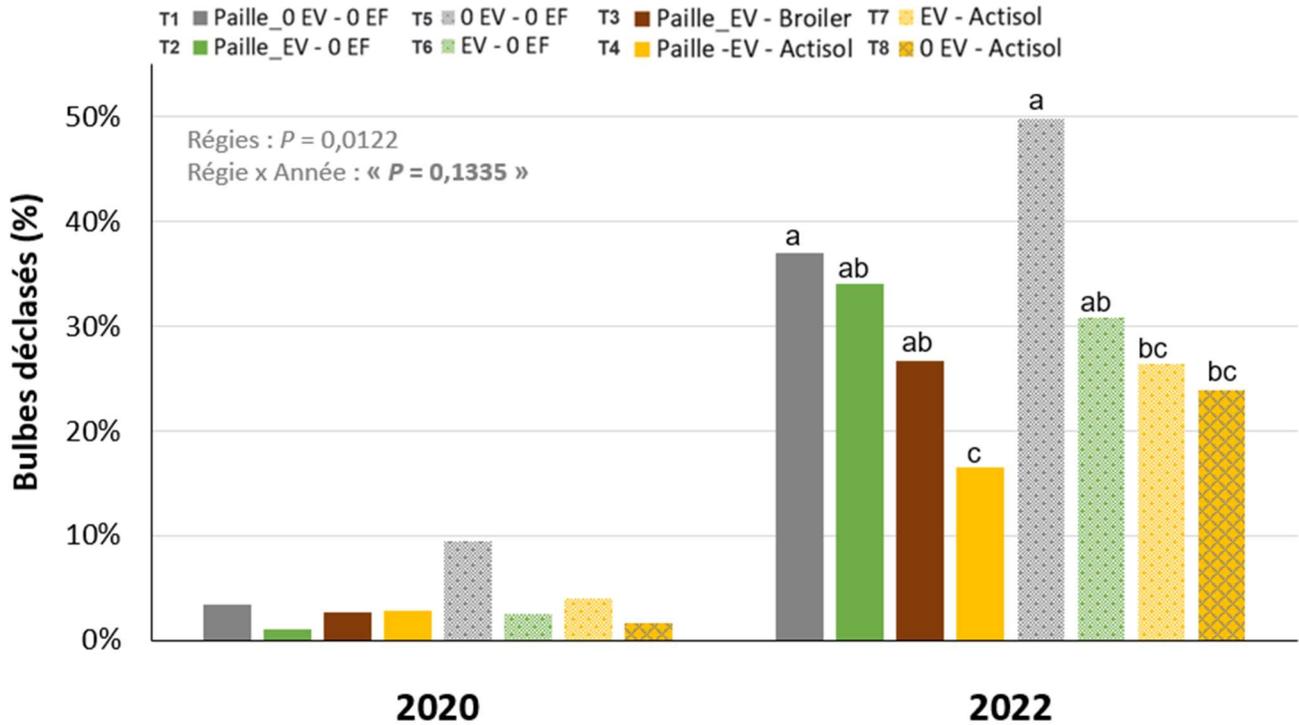


Figure 27. Proportion de bulbes déclassés selon les diverses régies testées, récoltes 2020 et 2022. Les régies identifiées avec des lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.



Figure 28. Photos de bulbes déclassés, saison 2022.

4.6.2 Conservation

Le potentiel de conservation de l'ail dépend de plusieurs facteurs, dont la variété, l'état phytosanitaire des plants et des bulbes, la maturité de l'ail à la récolte, les conditions climatiques de croissance et de maturation, les conditions de conditionnement et de séchage ainsi que les conditions d'entreposage (Legault G., 2023). Dans le cadre de l'étude, nous voulions également vérifier si les régies de fertilisation avaient influencé la conservation des bulbes. Cependant, diverses contraintes ont été rencontrées lors de l'étape de conservation et les données obtenues ne permettent pas d'affirmer si une régie a favorisé ou non une meilleure conservation. Il peut cependant être dit que lors du cycle 1 (2019-2020), après 90 jours d'entreposage, tous les bulbes étaient encore entièrement commercialisables et ne présentaient aucune détérioration. À cette date (19 novembre 2020), le poids moyen des bulbes était cependant plus faible qu'au départ (de 4,6 à 6,9 % selon les traitements) et les tuniques plus louses. Les conditions d'entreposage pour ce lot d'ail ont une température de 18°C et une humidité relative autour de 40 %. En 2022, il n'a pas été possible de déterminer la perte de poids des bulbes. Seule une évaluation de leur qualité a été effectuée le 19 décembre 2022, soit près de 120 jours après la sortie des bulbes du séchoir. Il aurait pu être pensé que les conditions climatiques et de croissance de 2022, facteur pouvant affecter le potentiel de conservation, auraient occasionné plus de pertes en entreposage. Toutefois, tous les bulbes observés étaient commercialisables et sans signe apparent de détérioration sauf un bulbe isolé dans la parcelle 15 (T1 : Paille-OEV-OEF). Pendant cette période, les conditions d'entreposage ont été une température avoisinant les 20°C et une humidité relative plus sèche que celle généralement recommandée pour la conservation de l'ail.

4.7 ÉVOLUTION DE LA SANTÉ DES SOLS

Plusieurs indicateurs reconnus de santé des sols ont été mesurés au stade bulbaison pour chacun des deux cycles de production du projet. Les indicateurs les plus informatifs ont été le contenu en carbone labile (C_{eau}) du sol, première source d'énergie des microorganismes, le taux de respiration microbienne du sol sur 10 jours (dégagement de CO_2), qui indique leur niveau d'activité et l'activité uréase, liée à la minéralisation du N organique en nitrate. Tous ont varié significativement en fonction des régies (Tableau 23), principalement selon la présence ou non de paille.

Le C_{eau} est l'indicateur ayant été le plus impacté avec une différence très importante selon la présence ou non de paille, sans impact de la fertilisation azotée. Ainsi, la présence de paille a favorisé de meilleures teneurs en C_{eau} du sol. En moyenne sur les deux années (aucune interaction Année X Régie), les sols sous paille contenaient donc 160 mg C_{eau} kg^{-1} vs. 90 mg C_{eau} kg^{-1} dans les sols non paillés, soit une différence de 78 %. Concordamment, la respiration microbienne était également plus élevée dans les sols paillés. De plus, dans le cas de la respiration, la fertilisation azotée a aussi eu un impact, mais seulement dans les sols sans paille. Ainsi, en moyenne sur les deux saisons (aucune interaction Année X Régie), le taux respiratoire des sols paillés était de 0,48 mg CO_2 g^{-1} . En absence de paille, le taux était moindre (0,37 mg CO_2 g^{-1}) pour les régies témoin et EV, mais tout aussi haut (47 mg CO_2 g^{-1}) dans les régies apportant plus de N (T7 et T8). Enfin, dans le cas de l'activité uréase, l'impact des traitements a été différent selon les années (interaction significative Année X Régie) et la fertilisation a eu un impact plus grand que pour les deux autres variables (Tableau 23). En 2020, l'activité demeure haussée par la présence de paille (en moyenne de 20 % vs sans paille), mais parmi les régies avec paille, l'activité est maximale dans les régies avec EF (T3 et T4) (72 ug N-NH₄ g^{-1}). À l'opposé, la valeur minimale se retrouve dans les régies sans EF (T5 et T6) (54 ug N-NH₄ g^{-1}) des sols sans paille. En 2022, il n'y a plus d'effet de la paille et les plus hautes activités sont mesurées dans les régies T7 et T8 (sans paille). Cela dit, au global des trois indicateurs, il peut être considéré que la paille stimule l'activité microbienne. Ceci concorderait avec l'effet immobilisant de la paille sur les flux de nitrate, les microorganismes utilisant probablement l'azote afin de dégrader celle-ci, stimulés par le C_{eau} . Cette activité accrue est également compatible avec le maintien de flux en phosphate plus élevés sous paille si l'activité microbienne de dégradation augmente les composés organiques compétitionnant pour les mêmes sites de fixation que le P inorganique. Si les microorganismes ont également haussé leur consommation de S, cela pourrait être expliqué par la teneur en S moindre des caïeux des régies avec paille.

Tableau 23. Valeurs de P des effets principaux de l'essai pour les deux cycles de production (2019-2020 ou 2021-2022) sur les indicateurs d'activité microbienne du sol au stade bulbaison.

Paramètres (b.s.)	C _{eau} (mg C g ⁻¹)	Respiration CO ₂ (mg CO ₂ g ⁻¹)	Uréase (μg N-NH ₄ g ⁻¹) ¹
Année	< 0,0001	0,0167	0,0555
Régie	< 0,0001	0,0013	0,0224
Année X Régie	n.s.	n.s.	0,0004

¹ Enzyme impliquée dans la minéralisation du N organique en N minéral disponible.

Au stade post-récolte, il ressort que la présence de paille, les deux années, maintient les teneurs en nitrate résiduel abaissées, malgré la présence en 2020 d'un intéressant potentiel de production azoté en réserve (16-20 kg N-NO₃ ha⁻¹) (Figure 29). Ce qui n'est pas le cas dans les sols sans paille, en 2022, alors que les régies le plus fertilisées (FGP60 et FGP110) présentent les contenus en nitrate résiduel les plus élevés. Ces régies (T7, T8) qui ont produit dans les rendements les plus hauts laissent donc tout de même dans le sol des quantités encore significativement plus élevées de nitrate et de N organique facilement minéralisable, en comparaison des autres régies. Encore une fois, ceci plaide pour une révision des recommandations puisqu'une part importante de l'azote apporté ne semble pas avoir été exploité bien que le site 2022 présentait une forte dépendance à la fertilisation N. En absence d'une culture subséquente (engrais vert, céréale d'automne, etc.) après la récolte de l'ail qui est réalisée tôt en saison (fin juillet/début août), cet azote sera sensible au lessivage et à risque de perte dans l'environnement, ce qui n'est pas souhaitable. Dans ce contexte, la paille semble donc limiter les risques, mais la meilleure stratégie serait de produire une grille de fertilisation permettant le juste apport de N selon le site. En attendant, les régies paillées exploitant les EV et une dose réduite de FGP apparaissent la meilleure option.

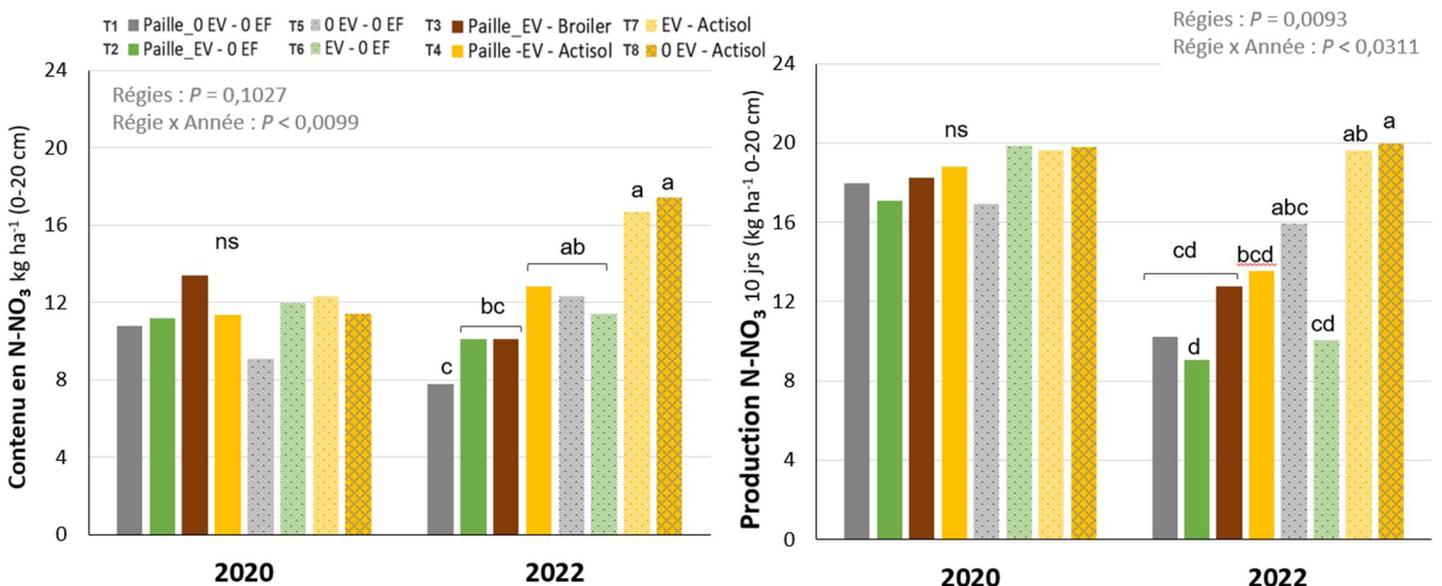


Figure 29. Nitrate résiduel et potentiel de production de nitrate par minéralisation post-récolte, selon les diverses régies testées, 2020 et 2022. Les régies identifiées avec des lettres distinctes sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

4.8 ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Les coûts de production liés aux traitements de fertilisation et de paillage et les revenus potentiels sont présentés aux Tableau 24. Coûts de production¹ reliés aux traitements (\$ ha⁻¹), pour les cycles de production 2019-2020 et 2021-2022. Tableau 24 et Tableau 25. Afin de pouvoir comparer les stratégies entre elles, le traitement sans paille, sans EV et sans EF (T1 : 0Paille-0EV-0EF) a été utilisé comme référence, car c'est celui qui occasionnait le moins de frais au niveau des intrants. Toutes les régies sont donc comparées en regard de ce traitement. Il en ressort que pour les deux saisons pourtant contrastées en termes de site et de météo, la régie offrant le meilleur gain de revenu est celle combinant un EV d'avoine-pois et une dose réduite de FGP au printemps (EV-FGP60), sans paille en 2020 (T7) et avec paille en 2022 (T4). En effet, ce traitement a permis des gains de revenu de 1,4 et 2,5 fois en comparaison du témoin 0Paille-0EV-0EF, en 2020 et 2022, respectivement. Par ailleurs, le traitement fertilisé seulement avec l'EV d'avoine-pois (EV-0EF) a permis une augmentation des revenus, par rapport au traitement sans intrants, de 12 % à 22 % en 2020, et ce pour un coût supplémentaire en intrants de seulement 237\$ ha⁻¹ à 2 205\$ ha⁻¹. En 2022, les gains pour ce traitement sont encore plus élevés, soit de 57 % à 68 %, pour le même coût supplémentaire à l'hectare. L'ajout de paille occasionne des frais supplémentaires d'environ 2000\$ ha⁻¹, mais les bénéfices liés à cette pratique ne sont pas totalement comptabilisés dans la présente étude. En effet, la paille permet une diminution du désherbage manuel et par conséquent des coûts de main-d'œuvre, une amélioration de la survie à l'hiver (selon le climat) et une augmentation du calibre des caïeux et de leur teneur en soufre. Lorsqu'un revenu pour un calibre moyen est considéré, la régie témoins Paille-0EV-0EF et la régie Paille-EV-FB ne permettent pas de gain par rapport au témoin 0EV-0EF-0Paille pour le cycle de production 2019-2020. Toutefois, si le calibre est tenu en compte pour le calcul des revenus, la régie Paille-EV-FB permet un revenu légèrement supérieur au témoin.

Tableau 24. Coûts de production¹ reliés aux traitements (\$ ha⁻¹), pour les cycles de production 2019-2020 et 2021-2022.

2019-2020								
	Sans EV Sans EF	EV Sans EF	EV FGP60	Sans EV FGP110	Sans EV Sans EF	EV FB60	EV Sans EF	EV FGP60
	Sans paille				Avec paille			
Machinerie²								
Semis et incorporation EV	0 \$	70 \$	70 \$	0 \$	0 \$	70 \$	70 \$	70 \$
Épandage EF	0 \$	0 \$	11 \$	11 \$	0 \$	43 \$	0 \$	11 \$
Paillage mécanique	0 \$	0 \$	0 \$	0 \$	24 \$	24 \$	24 \$	24 \$
Désherbage mécanique	56 \$	56 \$	56 \$	56 \$	0 \$	0 \$	0 \$	0 \$
Intrants³								
EV	0 \$	167 \$	167 \$	0 \$	0 \$	167 \$	167 \$	167 \$
Fumier Broiler	0 \$	0 \$	0 \$	0 \$	0 \$	362 \$	0 \$	0 \$
Fumier granulé de poule	0 \$	0 \$	473 \$	989 \$	0 \$	0 \$	0 \$	473 \$
Compléments (P et K)	730 \$	730 \$	654 \$	573 \$	730 \$	107 \$	730 \$	654 \$
Paille	0 \$	0 \$	0 \$	0 \$	2 000 \$	2 000 \$	2 000 \$	2 000 \$
TOTAL	786 \$	1 023 \$	1 430 \$	1 628 \$	2 754 \$	2 772 \$	2 991 \$	3 398 \$
Coûts de production par rapport à la régie sans intrant (\$)	0 \$	237 \$	644 \$	842 \$	1 968 \$	1 986 \$	2 205 \$	2 612 \$
2021-2022								
	Sans EV Sans EF	EV Sans EF	EV FGP60	Sans EV FGP110	Sans EV Sans EF	EV FB60	EV Sans EF	EV FGP60
	Sans paille				Avec paille			
Machinerie²								
Semis et incorporation EV	0 \$	70 \$	70 \$	0 \$	0 \$	70 \$	70 \$	70 \$
Épandage EF	0 \$	0 \$	11 \$	11 \$	0 \$	32 \$	0 \$	11 \$
Paillage mécanique	0 \$	0 \$	0 \$	0 \$	24 \$	24 \$	24 \$	24 \$
Désherbage mécanique	56 \$	56 \$	56 \$	56 \$	0 \$	0 \$	0 \$	0 \$
Intrants³								
EV	0 \$	167 \$	167 \$	0 \$	0 \$	167 \$	167 \$	167 \$
Fumier Broiler	0 \$	0 \$	0 \$	0 \$	0 \$	271 \$	0 \$	0 \$
Fumier granulé de poule	0 \$	0 \$	688 \$	1 247 \$	0 \$	0 \$	0 \$	688 \$
Compléments (P et K)	654 \$	654 \$	555 \$	473 \$	654 \$	94 \$	654 \$	555 \$
Paille	0 \$	0 \$	0 \$	0 \$	2 000 \$	2 000 \$	2 000 \$	2 000 \$
TOTAL	710 \$	947 \$	1 546 \$	1 787 \$	2 678 \$	2 658 \$	2 915 \$	3 514 \$
Coûts de production par rapport à la régie sans intrants (\$)	0 \$	237 \$	837 \$	1 077 \$	1 968 \$	1 948 \$	2 205 \$	2 804 \$

¹ Les coûts calculés ne prennent en compte que les frais des traitements de fertilisation et de paillage. La main-d'œuvre n'y est pas calculée, et peut représenter 30 à 50 % du coût total de production. Les frais relatifs à la mise en marché ne sont pas présentés, et varient en fonction des rendements et du type de mise en marché.

² Coûts de machinerie selon AGDEX 537/821b (2016), 740/825 (2018) et 258/821c (2019).

³ Coûts des intrants selon l'AGDEX 537/821b (EV), les prix des fournisseurs (engrais et EF) et AGDEX 258/821c (paille).

Tableau 25. Revenus pour un calibre moyen et par calibre (petit, moyen et gros) et gains potentiels par rapport à la régie sans paille, sans EV et sans EF pour les deux cycles de production.

2019-2020								
	Sans EV Sans EF	EV FB60	Sans EV Sans EF	EV Sans EF	Sans EV FGP110	EV FGP60	EV Sans EF	EV FGP60
	Avec paille	Avec paille	Sans paille	Avec paille	Sans paille	Avec paille	Sans paille	Sans paille
Rendements bulbes vendables (kg ha ⁻¹)	4921	5148	5203	5846	5825	6255	6353	7175
Revenus pour un calibre moyen¹ (\$ ha⁻¹)	110 733 \$	115 841 \$	117 067 \$	131 544 \$	131 053 \$	140 732 \$	142 944 \$	161 448 \$
Gains par rapport à la régie sans intrants ² (%)	-5 %	-1 %	0 %	12 %	12 %	20 %	22 %	38 %
Revenus par calibre (\$ ha⁻¹)³								
Petit 20-30 g	7 453 \$	3 889 \$	6 548 \$	4 743 \$	5 025 \$	3 410 \$	2 719 \$	5 366 \$
Moyen 30-50 g	87 334 \$	53 048 \$	72 879 \$	62 064 \$	67 362 \$	38 895 \$	54 470 \$	46 709 \$
Gros > 50 g	17 430 \$	68 671 \$	43 146 \$	75 387 \$	68 184 \$	115 308 \$	100 509 \$	127 845 \$
Total	112 217 \$	125 608 \$	122 572 \$	142 193 \$	140 571 \$	157 612 \$	157 697 \$	179 920 \$
Gains par rapport à la régie sans intrants ² (%)	-8 %	2 %	0 %	16 %	15 %	29 %	29 %	47 %
2021-2022								
	Sans EV Sans EF	Sans EV Sans EF	EV Sans EF	EV Sans EF	EV FB60	EV FGP60	Sans EV FGP110	EV FGP60
	Sans paille	Avec paille	Sans paille	Avec paille	Avec paille	Sans paille	Sans paille	Avec paille
Rendements bulbes vendables (kg ha ⁻¹)	1932	2474	3031	3236	3477	4079	4438	4834
Revenus pour un calibre moyen¹ (\$ ha⁻¹)	43 460 \$	55 664 \$	68 204 \$	72 816 \$	78 233 \$	91 781 \$	99 844 \$	108 774 \$
Gains par rapport à la régie sans intrants ² (%)	0 %	28 %	57 %	68 %	80 %	111 %	130 %	150 %
Revenus par calibre (\$ ha⁻¹)³								
Petit 20-30 g	9 884 \$	17 226 \$	7 503 \$	10 418 \$	8 265 \$	3 259 \$	2 932 \$	6 812 \$
Moyen 30-50 g	31 204 \$	34 680 \$	53 573 \$	51 353 \$	58 040 \$	48 794 \$	45 674 \$	53 790 \$
Gros > 50 g	1 004 \$	1 306 \$	7 036 \$	11 120 \$	12 550 \$	46 200 \$	59 817 \$	55 501 \$
Total	42 091 \$	53 211 \$	68 112 \$	72 891 \$	78 856 \$	98 253 \$	108 422 \$	116 103 \$
Gains par rapport à la régie sans intrants ² (%)	0 %	26 %	62 %	73 %	87 %	133 %	158 %	176 %

¹ Prix moyen de 22,50\$ kg⁻¹.

² Les traitements ont été comparés par rapport à la régie sans paille, sans EV et sans EF.

³ Prix par catégorie de grosseur de bulbe: petit: 19,50\$ kg⁻¹, moyen: 22,50\$ kg⁻¹, gros: 26,50\$ kg⁻¹.

5 CONCLUSION

Ce projet comparait diverses régies de fertilisation azotée combinant des engrais verts (EV) et de ferme (EF), avec ou sans paillage, dans la culture d'ail biologique. Le 1^{er} cycle (2019-2020) d'étude a présenté un automne froid et un été sec comprenant de rares pluies lors d'événements sévères, en comparaison d'un automne chaud et d'un été frais et pluvieux propices aux maladies lors du 2^e cycle (2021-2022). La paille a fortement nivelé ces variations de température dans le sol. Cette météo a cependant fait varier la biomasse (40 %) et le contenu en N (30 %) des EV, mais la quantité de N efficace produite a été similaire (moy. 33 kg N_{eff} ha⁻¹) démontrant l'avantage des mélanges graminées-légumineuses. Les EV étaient également riches en K (160 kg K₂O ha⁻¹). Les régies ont peu modifié la biomasse des plants, outre la paille qui a décalé la croissance d'une semaine, en plus de produire des plants 50 % plus petits en début de saison 2020. Cependant, aucun lien n'a été mesuré entre la masse des plants et les rendements produits. En fait, c'est avec le contenu en N de la biomasse qu'une relation a été établie avec le rendement final. En 2022, au stade pré-bulbaison, cette relation atteignait un R² = 0,91.

En automne, la régie avec fumier de *broiler* (FB), plus résistante à la minéralisation, n'a pas haussé les flux de nitrate, malgré les quantités de N_{total} apportées. Pour leur part, les régies d'EV seuls ont fait diminuer ces flux, en comparaison des sols témoins. Il se peut qu'une partie du nitrate ait été réorganisée en N organique dans la biomasse microbienne activée par le C labile fourni par les EV. Le fait que ces sols présentaient un potentiel de production de nitrate supérieur aux sols témoins appuie cette hypothèse. En saison, la paille a été le facteur déterminant sur les flux. Indépendamment de la fertilisation, les sols paillés présentaient des flux de phosphate supérieurs et des flux de nitrate réduits. Puisque les sols paillés contenaient beaucoup plus C labile et présentaient un taux respiratoire microbien plus élevé, il se peut qu'une partie du nitrate ait été immobilisée. Les ions ammonium peuvent aussi être fixés sur la paille, empêchant leur conversion en nitrate. Certains produits découlant de l'activité microbienne peuvent aussi abaisser la fixation des ions phosphate par les particules de sol, permettant leur maintien en solution du sol. Pour sa part, la fertilisation a modifié les flux de nitrate et phosphate dans 3/7 et 6/7 périodes en 2020 et 2022, respectivement. La régie FB étant paillée, aucune hausse des flux de nitrate n'a pu être observée. Dans le cas des fientes granulées de poules (FGP), très labiles, une hausse forte et rapide des flux de nitrate a été captée dès leur application au printemps. Toutefois, ce n'est pas la proportion d'EF qui a été déterminante, mais la dose totale de N toutes sources confondues (EV-FGP60 ≥ EV-FGP110). Ceci démontre l'efficacité des EV dans la fertilisation azotée. Cependant, puisque les flux de nitrate des sols avec EV seuls n'étaient pas différents de ceux du sol témoin, l'effet des EV semble davantage passer par une stimulation de la minéralisation du N organique des EF. En ce qui a trait au phosphate, le type et la dose de fertilisant semblent avoir eu très peu ou pas d'effet sur les flux mesurés, même pour la régie FB, malgré un apport total de P largement supérieur aux autres régies.

En termes de rendements (53 % hum), une forte réponse à la fertilisation a été mesurée les deux années (2020 : ≤ 39%; 2022 : ≤ 60%). Ceci a permis de confirmer que la dose d'apport de N joue sur le rendement en termes de quantité, sur le calibre et sur le taux de déclassement, tandis que la paille joue sur le poids des caïeux, leur teneur en S et les maladies. Ainsi, dans un contexte moins exigeant en N (2020), les meilleurs rendements ont été obtenus avec les régies à doses réduites d'EF et de N, incluant même les régies EV seuls (35 kg N_{eff} ha⁻¹). Dans un contexte plus exigeant (2022), les apports par EV se sont cependant avérés insuffisants. Cela dit, il n'y a eu aucun gain les deux saisons à apporter la plus forte dose de N (110N, 100 % EF). La régie offrant au global le meilleur gain de revenu (1,4 - 2,5 x), en comparaison du témoin, est donc celle d'une dose réduite de FGP au printemps (EV-FGP60) combinée à un EV, avec ou sans paille selon l'année (apport de N efficace ≈ 15 % inférieur vs. FGP110). À l'opposé, l'apport automnal de FB présente une productivité 30 % inférieure, similaire aux rendements des régies témoins (0N). L'intensité de production de nitrate au printemps semble donc déterminante puisque malgré un apport en N_{eff} plus élevé les deux années, la régie avec FB sous-performe. En ce qui a trait à la paille, celle-ci n'influence pas le rendement, mais génère des caïeux jusqu'à 40 % plus gros et à teneurs plus élevées en S, tandis que l'apport de N augmente fortement le calibre des bulbes (proportion de calibre > 51 g). La paille a aussi diminué l'incidence des maladies. Avec les récoltes, chaque tonne d'ail a exporté : 11,3, 5,4, 7,1 et 8,0 kg de N, P₂O₅, K₂O et SO₃. Cela représente des exportations de 60, 28, 39 et 45 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, K₂O et SO₃, respectivement, soit près de la moitié des

recommandations actuelles en azote, la borne inférieure des recommandations en phosphore et une valeur faible de l'intervalle de recommandation en K (CRAAQ 2010).

Cette étude confirme la nécessité de réaliser une grille de référence en fertilisation québécoise spécifique à la culture de l'ail étant donné les gains économiques et environnementaux anticipés par la diminution d'apports de fertilisants. De plus, elle illustre le besoin d'approfondir nos connaissances sur la valeur comme engrais potassique des EV, tant en termes de quantité que de disponibilité, afin d'en tenir compte dans la fertilisation. Elle démontre aussi le potentiel de développement d'analyses foliaires comme outil de gestion de la fertilisation. De même, l'important impact de la paille sur la teneur en S des caïeux indique la pertinence de conduire une première étude sur le bilan S et l'impact des régies sur cet élément. Enfin, vu la productivité à chacune des deux années de la régie EV-FGP60, des essais à grande échelle seraient à envisager pour tester son utilisation dans différents contextes de production, notamment lors d'application des FGP directement sur la paille .

6 RÉFÉRENCES

- Association pour le commerce des produits biologiques.** 2017. L'état du secteur des produits biologiques: Rapport fédéral - provincial - territorial sur le rendement 2017. 28 pages.
- Bhogal A., Young S. D. et Sylvester-Bradley, R.** 1997. Straw incorporation and immobilization of spring-applied nitrogen. *Soil Use and Management*. 13. Pages 111-116.
- Boyhan, G. E., W. T. Kelley et Granberry, D. M.** 2017. Production and Management of Garlic, Elephant Garlic and Leek. University of Georgia Extension.
- Cao, N., Wang, J., Pang, J., Hu, W., Bai, H., Zhou, Z., Meng Y. et Wang, Y.** 2021. Straw retention coupled with mineral phosphorus fertilizer for reducing phosphorus fertilizer input and improving cotton yield in coastal saline soils. *Field Crops Research*, 274, 108309.
- Cao, N., Zhi, M., Zhao, W., Pang, J., Hu, W., Zhou, Z., et Meng, Y.** 2022. Straw retention combined with phosphorus fertilizer promotes soil phosphorus availability by enhancing soil P-related enzymes and the abundance of phoC and phoD genes. *Soil and Tillage Research*, 220, 105390.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ),** Priorités de recherche et de transfert de connaissances en agriculture biologique au Québec – Horizon 2017-2022. [Priorités et besoins de recherche et de transfert de connaissances en agriculture biologique au Québec. Horizon 2017-2022 Agri-Réseau | Documents \(agrireseau.net\).](#)
- Cheng, H., Zhu, X., Sun, R., Niu, Y., Yu, Q., Shen, Y., et Li, S.** 2020. Effects of different mulching and fertilization on phosphorus transformation in upland farmland. *Journal of environmental management*, 253, 109717.
- Chen, H., Liu, Y., Lü, L., Yuan, L., Jia, J., Chen, X., Ma, J., Zhao, J., Liang, C., Xie, H., He, H., Zhang, X., Lu, C., Chi, G.** 2021. Effects of no-tillage and stover mulching on the transformation and utilization of chemical fertilizer N in Northeast China. *Soil Tillage Res.* 213, pages 105-131.
- Cheshire, M., Bedrock, C., Williams B., Chapman S., Soltseva, I. et Thomsen, I.** 1999. The immobilization of nitrogen by straw decomposing in soil. *European Journal of Soil Science*. 50. Pages 329-341.
- CRAAQ.** 2010. Guide de référence en fertilisation du Québec, 2e édition. 473 pages.
- CRAAQ,** 2019. Références économiques : Ail, opérations semi-mécanisées. AGDEX 258/821c. 8 pages.

- CRAAQ.** 2016. Références économiques : Engrais verts semés à la dérobée et en intercalaire, coûts d'implantation. AGDEX 537/821b. 5 pages.
- CRAAQ.** 2018. Références économiques : Machinerie, coûts d'utilisation et taux à forfait suggérées. AGDEX 740/825. 8 pages.
- CRAAQ.** 2020. Guide de production – Ail. Chapitre 3 – Production d'ail de consommation. 188 pages.
- CRAAQ.** 2022. Priorités de recherche et de transfert de connaissance en agriculture biologique – Québec – 2022-2028. Disponible en ligne sur AgriRéseau : https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/109773/_priorites-de-recherche-et-de-transfert-de-connaissances-en-agriculture-biologique-quebec-2022-2028 21 pages.
- Damon, P. M., Bowden, B., Rose, T. et Rengel, Z.** 2014. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 74, 127-137.
- Desnoyers L.** 2018. Sondage auprès des producteurs d'ail au Québec. Journée provinciale de l'ail.
- Duval, J., Weill, A., et N'Dayegamiye, A.** 2014. Contribution en azote en provenance des engrais verts de légumineuses. CETAB. 6 p.
- Filière des plants médicinaux biologiques du Québec.** 2009. L'ail, guide de production sous régie biologique. 29 pages.
- Ford, T. G., Bogash, S. M., Orzolek, M. D., Kime, L. F. et Harper, J. K.** Garlic production. 2015. Pennsylvania State University.
- Groupe Envir-Eau-Sol Inc.,** 2012. Évaluation de différents engrais verts comme précédent cultural à la production de maïs-grain biologique. Rapport final 09-INNO1-01. 16 pages.
- Guo, Z., Ye, W., Wang, H., He, W., Tian, Y., Hu, G., Lou, Y., Pan, H., Yang, Q. et Zhuge, Y.** 2024. Straw and phosphorus applications promote maize (*Zea mays* L.) growth in saline soil through changing soil carbon and phosphorus fractions. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1336300.
- Joly-Séguin, V., Deslauriers, G., Landry, C., Mainguy, J., Houde, S. et Lacroix, C.** 2023. Déterminer l'apport d'azote par minéralisation des paillis dans la culture du bleuet en corymbe afin que la fertilisation azotée minérale soit mieux adaptée aux besoins de la culture. 47 pages.
- Landry, C., Côté, C., Hogue, R., Marchand-Roy, M., Généreux, M. et Mainguy, J.** 2016. Impact des cultures de couverture et des engrais de ferme sur la dynamique saisonnière de l'azote et du potassium dans la culture de la carotte biologique en terres noires. Présentation au Colloque Bio 2016.
- Landry, C., Marchand-Roy, M., Mainguy, J., Côté, C., Généreux, M., Belzile, L. et Godonou, D.** 2018. Développement d'une régie de fertilisation combinant des engrais verts et des engrais de ferme pour combler les besoins en azote d'une rotation blé/maïs-grain/soya tout en limitant les apports de phosphore en production biologique. Rapport final IA 115487. IRDA 46 pages.
- Landry, C., Marchand-Roy, M., Mainguy, J. et Paradis, M.** 2019. Détermination terrain du coefficient d'efficacité azoté et du délai de libération du N des fientes granulées de poules pondeuses dans les cultures de maïs-grain et avoine. Rapport final IA 216694. IRDA. 50 pages.
- Landry, C., Marchand-Roy, M., Mainguy, J.** 2020. Approche intégrée de fertilisation azotée permettant la production rentable de pommes de terre biologiques générant un bilan de phosphore équilibré. Projet Innov'Action no. IA116643. Rapport final. IRDA. 57 pages.
- Landry, C., Demers, A., Mainguy, J.** 2023. Essai de faisabilité de l'application sur paille de fientes granulées de poules (FGP) au printemps dans l'ail. Rapport final PADAAR N°7392510.

- L'ail du Québec** - cahier spécial réalisé par la Terre de chez nous. 2018. 12 pages.
- Legault, G.** 2023. Maladies et conditionnement de l'ail. Présentation dans le cadre des journées horticoles de la Mauricie 1^{er} février 2023.
- Olson, S. M., Dittmar, P. J., Peres, N.A. et Webb, S.E.** 2012. Chapter 14 – Onion, Leek, and Chive Production in Florida. University of Florida IFAS Extension.
- Pavinato, P. S., Merlin, A., et Rosolem, C. A.** 2009. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. *Soil and Tillage Research*, 105(1), 149-155.
- Portail Bio Québec.** 2022. <https://www.portailbioquebec.info/superficies-cultivees-par-produit-vegetal-en-2021>
- Roy, J. et Couture, I.** 2019. Ail bio : comment optimiser sa fertilisation azotée? Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec.
- Shi, Y., Ziadi, N., Messiga, A. J. et Lalande, R.** 2016. Nongrowing season soil surface nitrate and phosphate dynamics in a corn-soybean rotation in eastern Canada: *in situ* evaluation using anionic exchange membranes. *Canadian Journal of Soil Science*. 96 (2), 136-144.
- Statistique Canada.** 2024. Baisse de la production et des ventes d'ail. [Baisse de la production et des ventes d'ail - Statistique Canada \(statcan.gc.ca\)](#)
- Southeastern Vegetable Extension Workers, Southeastern US 2018 vegetable crop handbook.** 2018. 297 pages.
- Tiessen, H. J. W. B., Stewart, J. W. B., et Cole, C. V.** 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal*, 48(4), 853-858.
- UC Davis.** 2020. Garlic – Leaf Analysis Guide for Diagnosing Crop Nutrient Status. [GARLIC Leaf Analysis Guide for Diagnosing Crop Nutrient Status \(ucdavis.edu\)](#)
- Verville, F.** 2014. Effet des engrais verts et de leur période d'enfouissement sur la nutrition azotée et les rendements du blé. Mémoire de maîtrise, U. Laval. 102 pages.
- Weill, A. et Duval, J.** 2009. Le maraîchage biologique diversifié : Guide de gestion globale. Équiterre et Club Bio-Action. 359 pages.
- Zamuner, E. C., Picone, L. I., et Echeverria, H. E.** 2008. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 131-138.
- Ziadi, N., Simard, R.R., Tran, T.S. et Allard, G.** 2001. Soil-available phosphorus as evaluated by desorption techniques and chemical extractions. *Canadian Journal of Soil Science*. 81 (2), 167-174.