

Rapport final

IA219139

Impact des cultures de couverture d'automne sur les rendements d'oignon sec en terre
noire

Carl Dion Laplante, agr.
Anne-Marie Fortier, M.Sc.

Compagnie de recherche Phytodata

15 novembre 2021

Résumé du projet

Les cultures de couverture (CC) possèdent de nombreux bénéfices reconnus, notamment la diminution de l'érosion hydrique et éolienne et le recyclage des nutriments du sol. L'utilisation de cultures de couverture est complexe en production maraîchère à cause des particularités du secteur, notamment l'incidence importante des problèmes phytosanitaires, la période de culture s'étalant sur toute la saison, et les standards rigoureux dans la qualité des produits. En production maraîchère en terre noire, l'adoption des cultures de couverture est freinée par des incertitudes liées aux effets des cultures de couverture sur la fertilité du sol et le travail du sol printanier. L'apport en azote des cultures de couverture est assez bien connu en production maraîchère en terres minérales, et ces connaissances sont déjà utilisées dans la gestion intégrée de la fertilisation azotée dans ces cultures, notamment en production biologique. Toutefois, cette information n'est pas disponible pour les terres noires. L'équivalent en azote minéral, ou ENM, est défini comme la quantité de fertilisant azoté requis afin de produire le rendement d'une culture sur sol nu qui est identique au rendement obtenu après l'enfouissement d'une culture de couverture. Puisqu'il est basé sur les rendements obtenus dans la culture principale sans égard aux prélèvements d'azote réels par la culture, l'ENM ne peut pas séparer l'apport en N des CC de leurs bénéfices non-azotés. En représentant l'ensemble de ces effets en une valeur d'engrais azoté, l'ENM demeure toutefois une valeur accessible et applicable par les producteurs agricoles.

Ce projet visait à évaluer l'effet de différentes espèces de cultures de couverture implantées en automne sur les rendements en production d'oignon sec en terre noire, notamment en déterminant l'équivalent en azote minéral (ENM) des CC étudiées dans la culture de l'oignon. De 2019 à 2021, 4 sites ont été suivis dans l'oignon sec en terre noire en Montérégie-Ouest, afin de comparer l'effet de différentes espèces de CC semées hâtivement ou tardivement sur les rendements des oignons. Ce projet a permis de constater le rôle des cultures de couverture d'hiver sur la fertilité du sol en automne et durant la saison suivante, et souligne l'importance de considérer les cultures de couverture dans la fertilisation des légumes en terre noire. Cependant, ce projet a aussi confirmé la faible réponse de l'oignon sec à l'azote en sols organiques. Il n'a donc pas été possible dans ce projet de calculer l'ENM des différentes CC étudiées. Les résultats obtenus suggèrent tout de même que les CC d'hiver pourraient avoir un impact sur les rendements d'autres cultures sensibles à l'azote, et que la fertilisation azotée en sols organiques pourrait être réduite en considérant l'apport azoté des cultures de couverture. Malgré tout, aucune recommandation précise n'a pu être élaborée à cause de la variation importante entre les sites et les années. Des efforts supplémentaires sont nécessaires afin de mieux coordonner la fertilisation minérale et l'apport azoté des CC avec les besoins de la culture.

Méthodologie

De 2019 à 2021, quatre sites ont été installés chez des producteurs d'oignon sec en sol organique. Chaque site comprenait trois blocs de 14 traitements, pour un total de 42 parcelles par site (Annexe 1). Chaque parcelle mesurait trois planches de largeur par dix mètres de longueur. Les traitements consistaient en cinq espèces de cultures de couverture semées chacune à deux dates différentes à l'automne, pour un total de dix combinaisons, ainsi que trois doses d'engrais azoté minéral sans culture de couverture et un témoin non fertilisé (Tableau 1). Les deux-tiers de la

fertilisation azotée étaient appliqués en pré-semis, et le tiers restant était appliqué au stade de deux à quatre feuilles. Les CC ont été semées à la volée, sans ajout de fertilisants, puis enfouies à l'aide d'un râteau suivi du passage d'un rouleau de semis. Puisque le semis des CC était réparti sur une longue période, un désherbage des parcelles a été effectué manuellement au besoin. Le calendrier des opérations se trouve à l'annexe 2.

Tableau 1. Liste des traitements réalisés

Traitement	Culture de couverture	Date de semis
1	Pois fourrager – 100 kg/ha	Fin août
2	Pois fourrager – 100 kg/ha	Fin septembre
3	Vesce commune – 40 kg/ha	Mi-août
4	Vesce commune – 40 kg/ha	Début septembre
5	Trèfle incarnat – 25 kg/ha	Mi-août
6	Trèfle incarnat – 25 kg/ha	Mi-septembre
7	Avoine – 100 kg/ha	Début septembre
8	Avoine – 100 kg/ha	Fin septembre
9	Seigle d'automne – 110 kg/ha	Fin septembre
10	Seigle d'automne – 110 kg/ha	Mi-octobre
11	Engrais – 0 kg N/ha	N/A
12	Engrais – 65 kg N/ha	N/A
13	Engrais – 130 kg N/ha	N/A
14	Engrais – 195 kg N/ha	N/A

Au printemps suivant, la destruction des CC, la préparation du terrain et le semis de l'oignon ont été effectués par le producteur. Les sites 2 et 4 ont été cultivés en oignon planté plutôt que semé, puisque le producteur jugeait que les résidus de CC dans certaines parcelles (notamment l'avoine hâtif et le seigle) étaient trop abondants et pouvaient nuire aux opérations de semis. Les piquets marquant la position du site 3 ont été perdus après la destruction des CC par le producteur au printemps 2021; par conséquent, ce site a été abandonné et aucune donnée de nitrates du sol et de rendements d'oignon n'a pu être prélevée durant la croissance de l'oignon. La fertilisation des parcelles a été réalisée par l'équipe de Phytodata entre la destruction des CC et le semis de la culture; toutes les parcelles ont reçu la dose recommandée de phosphore et de potassium selon le Guide de référence en fertilisation (CRAAQ), et les traitements 12 à 14 ont reçu la dose d'azote prévue. L'irrigation, le désherbage et les applications de pesticides ont été effectuées par le producteur selon une régie conventionnelle. Finalement, la récolte a été réalisée par l'équipe de Phytodata sur trois mètres et quatre rangs doubles au centre de chaque parcelle (12 mètres linéaires), ainsi qu'à trois endroits choisis aléatoirement dans le reste du champ afin d'obtenir le rendement dans la régie producteur. Il a été constaté que la récolte sur 12 mètres linéaires était excessive (2 poches pleines par parcelle), la récolte a donc été effectuée sur seulement 1,5 mètres par parcelle (6 mètres linéaires) dans le site 4.

Nitrates du sol

À l'automne, à chaque date de semis des CC, la concentration en nitrates du sol a été mesurée dans les parcelles semées cette date-là et dans le témoin non fertilisé (traitement 11), puis en

novembre avant le gel dans les traitements 1 à 11, pour un total de deux échantillons de sol par parcelle pour les traitements 1 à 10 et six échantillons pour le témoin non fertilisé durant l'automne.

La saison suivante, les nitrates du sol ont été mesurés avant la fertilisation en pré-semis de l'oignon, au moment du fractionnement de la fertilisation azotée, au stade de début bulbaison, puis à la récolte de l'oignon. Dans le site 2, les CC ont été détruites une semaine avant l'échantillonnage de sol au printemps, ce qui a pu affecter les mesures de nitrates du sol. Les échantillons de sol prélevés au moment du fractionnement de l'engrais azotée dans le site 2 et à la récolte dans le site 4 n'ont pas pu être traités; ces résultats ne sont donc pas présentés.

Biomasse aérienne et azote total des cultures de couverture

En début novembre, il était prévu que la biomasse aérienne des CC soit prélevée dans deux quadrats de 25 cm par 25 cm dans chaque parcelle des traitements 1, 2, 4, 6, 7 et 8, et que la biomasse soit prélevée au printemps dans les autres traitements, qui devaient survivre à l'hiver. Aucune CC n'ayant produit de nouvelles pousses au printemps 2020 avant leur destruction, aucune donnée de biomasse et d'azote total n'a pu être obtenue pour les traitements 3, 5, 9 et 10 des sites 1 et 2, et la biomasse aérienne a été prélevée à l'automne pour les traitements 1 à 10 dans les sites 3 et 4. Le feuillage prélevé a été pesé, puis séché dans une étuve et pesé de nouveau afin d'obtenir la biomasse sèche, et la concentration en azote total du feuillage a été mesurée. À l'automne 2019, quelques centimètres de neige étaient déjà tombés au moment de la récolte des biomasses, ce qui a pu nuire au prélèvement du feuillage.

Rendement de la culture principale

Pour chaque parcelle, les oignons récoltés ont été calibrés selon un gabarit préétabli (<5 cm de diamètre; 5 à 5,75 cm; 5,75 à 6,35 cm; 6,35 à 7 cm; 7 à 7,6 cm; et >7,6 cm), puis dénombrés et pesés par calibre. Un échantillon représentatif de 500g a ensuite été prélevé pour chaque parcelle et séché dans une étuve, puis pesé de nouveau afin d'obtenir le taux de matière sèche.

Analyses statistiques

La biomasse aérienne des CC a été convertie en tonne de matière sèche par hectare (t.m./ha b.s.) et la fourniture en azote théorique des CC (kg N/ha) a été obtenue en multipliant la biomasse sèche par la concentration en azote total du feuillage. Les mesures de concentrations en nitrates du sol ont été converties en kilogramme de nitrates par hectare (kg NO₃/ha) à partir de la densité apparente du sol mesurée dans chaque site. Le rendement vendable frais a été obtenu en excluant les bulbes rejetés pour causes de maladies, dommages ou faible calibre (moins de 5 cm de diamètre), et converti en tonne par hectare (t.m./ha). Le rendement vendable sec a été calculé en tonne par hectare (t.m./ha b.s.) à partir du rendement vendable frais et du taux de matière sèche obtenus dans chaque parcelle.

Pour chaque site récolté, une courbe dose-réponse a été réalisée à partir des données de rendement vendable pour les parcelles avec azote minéral et sans culture de couverture (traitements 11 à 14). Le modèle qui convenait le mieux aux données pour tous les sites a été sélectionné. L'objectif était d'utiliser la courbe dose-réponse obtenue afin de calculer l'équivalent en azote minéral (ENM) pour chacun des traitements de cultures de couverture. L'ENM a été

obtenu en résolvant l'équation de la courbe dose-réponse pour le rendement obtenu dans chaque parcelle des traitements 1 à 10. Lorsque le rendement obtenu dans la parcelle dépassait le maximum atteint par la courbe dose-réponse, la dose permettant d'obtenir le rendement maximal a été utilisée comme ENM.

Les données de rendements, de biomasse sèche, de teneur en azote, de fourniture azotée des CC, et de nitrates du sol à l'automne et au printemps ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA), suivie du test de comparaisons multiples LSD de Fisher lorsque l'ANOVA était significative. L'homogénéité des variances a été vérifiée et la transformation $\log(x+1)$ a été utilisée au besoin.

Résultats et discussion

Biomasse et apport en azote des cultures de couverture

Les résultats de biomasse, concentration en azote total et fourniture azotée des cultures de couverture sont présentés à l'annexe 3. Les biomasses sèches ont varié de 0,05 t.m./ha (seigle tardif, sites 3 et 4) à 2,98 t.m./ha (pois hâtif, site 3). En général, la biomasse sèche du pois et de l'avoine hâtifs était significativement supérieure aux autres traitements. Le trèfle tardif a aussi obtenu une biomasse importante dans le site 2, de même que la vesce et le trèfle hâtifs dans les sites 3 et 4. Les autres traitements étaient tous inférieurs ou égaux à 1 t.m./ha.

Concernant les concentrations en azote du feuillage, les valeurs variaient de 2,21% (vesce tardive, site 2) à 6,08% (pois tardif, site 3). Le pois et l'avoine tardifs avaient les plus grandes teneurs en azote dans tous les sites, tandis que l'avoine hâtif obtenait la valeur la plus faible sauf dans le site 2. En général, les semis tardifs (traitements pairs) avaient une plus grande teneur en azote que les semis hâtifs (traitements impairs), ce qui était attendu puisque les jeunes tissus végétaux ont généralement un rapport C/N plus bas, et donc une teneur en azote plus élevée que les tissus plus âgés. Cette propriété est exprimée dans la relation entre la biomasse obtenue et la teneur en azote du feuillage (Fig. 1), les biomasses étant généralement plus élevées dans les semis hâtifs.

Dans la figure 1, on observe aussi une différence marquée entre les sites 1 et 3, tous les deux réalisés chez le même producteur, et les sites 2 et 4, installés chez un autre producteur. Notamment, la teneur en azote semble plus élevée dans les sites 1 et 3 que dans les sites 2 et 4, bien que les biomasses obtenues soient similaires. Le sol des sites 1 et 3 était généralement plus jeune et moins dégradé que dans les sites 2 et 4. Dans les sols organiques, Duguet (2005) avait observé une forte corrélation entre la teneur en azote dans le feuillage du raygrass et le prélèvement d'azote par la plante, ainsi qu'entre le prélèvement d'azote par la plante et le pouvoir minéralisateur du sol. Il est donc possible que le sol dans les sites 1 et 3 avait un plus grand pouvoir de minéralisation que dans les sites 2 et 4. Il n'existe cependant aucun indicateur fiable du pouvoir minéralisateur des sols organiques au Québec qui permettrait d'expliquer cette différence. Ceci souligne la difficulté d'extrapoler les résultats à d'autres sites dans le cadre d'essais touchant la fertilisation azotée en sols organiques. Afin d'éliminer cet effet, les essais devraient être reproduits sur une grande quantité de sites, et des indicateurs devraient être développés afin de pouvoir regrouper les sites ayant des propriétés de sol similaires.

La fourniture azotée théorique des cultures a été obtenue à partir des résultats de biomasses et de teneurs en azote. Les valeurs sont théoriques puisque ce calcul ne considère pas la disponibilité de l'azote dans la CC, ni les pertes entre la mort de la CC et le semis de l'oignon. Les valeurs vont de 2,54 kg N/ha (seigle tardif, site 3) à 139,9 kg N/ha (pois hâtif, site 3). Pour l'ensemble des sites, le pois et l'avoine hâtifs obtiennent les fournitures azotées les plus élevées. La vesce et le trèfle hâtifs, ainsi que le trèfle tardif, ont obtenu des résultats comparables au pois et à l'avoine hâtifs, mais pas dans tous les sites. La fourniture azotée du pois et de l'avoine tardifs était significativement inférieure aux autres traitements dans les sites 1, 2 et 4, et le seigle tardif a aussi donné une faible fourniture azotée dans les sites 3 et 4. Dans l'ensemble, la fourniture azotée théorique est fortement proportionnelle à la biomasse des CC, la teneur en azote des CC ayant peu d'impact sur les résultats.

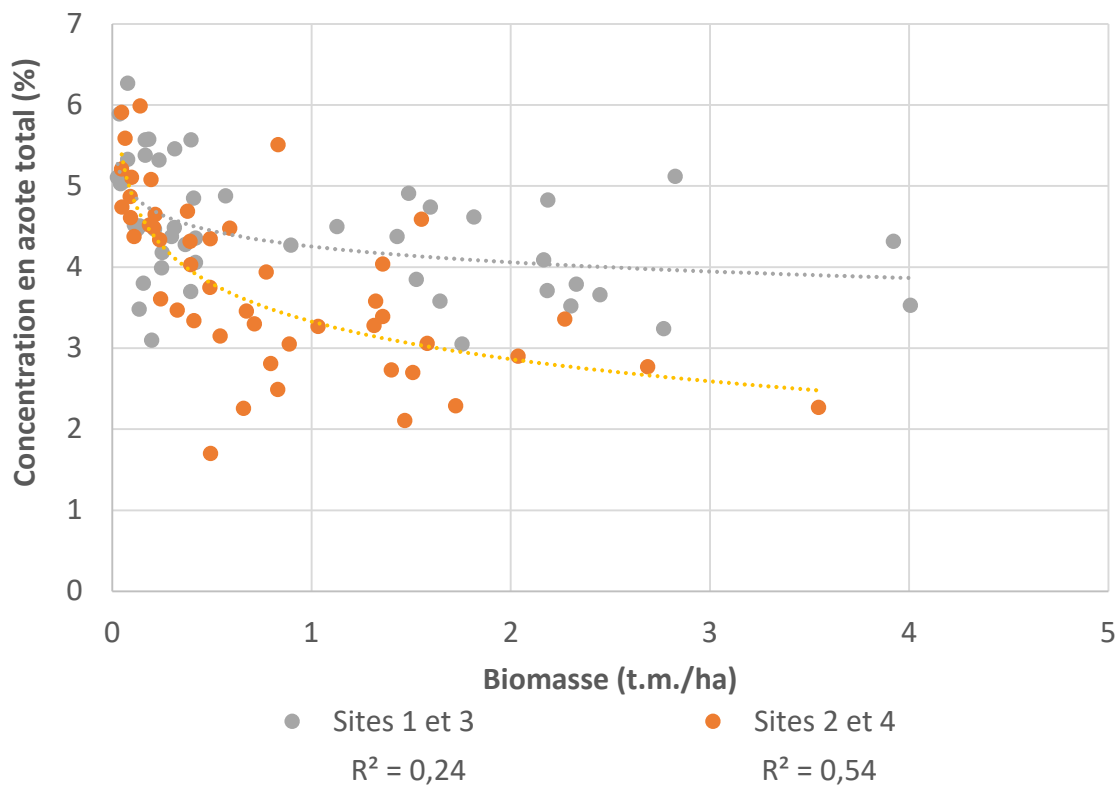


Figure 1. Concentration en azote total des CC en fonction de la biomasse sèche obtenue

Nitrates du sol

Les nitrates du sol à l'automne, au printemps et durant la croissance de l'oignon sont présentés à l'annexe 4. Les teneurs en nitrates ont évolué de façon similaire dans tous les traitements durant le cycle de croissance de l'oignon, atteignant un pic au moment de la fertilisation post-semis (juin) et diminuant jusqu'au stade de bulbaison.

Les teneurs en nitrates étaient en moyenne sept fois plus élevées à l'automne 2020 qu'à l'automne 2019. Cela s'explique par les conditions climatiques lors de l'échantillonnage du sol,

très froides en 2019 (présence de neige, maximum -1°C) et plutôt chaudes en 2020 (température maximale de $17,5^{\circ}\text{C}$), la minéralisation de l'azote en terre noire étant pratiquement nulle en bas de 5°C (Duguet, 2005). Dans les sites 2, 3 et 4, les nitrates en automne sont généralement inférieurs dans les semis hâtifs (traitements impairs) par rapport aux semis tardifs (traitements pairs), mais les différences ne sont pas toujours significatives. On peut observer une corrélation entre la biomasse des CC et les nitrates du sol dans les sites regroupés par année ($R^2 = 0,17 - 0,47$) (Fig. 2), indiquant que les CC produisant une biomasse suffisante peuvent jouer un rôle important dans le recyclage de l'azote en fin de saison, ce qui peut avoir un impact sur la culture de la saison suivante. Cette relation existait aussi dans les sites analysés individuellement ($R^2 = 0,27 - 0,62$).

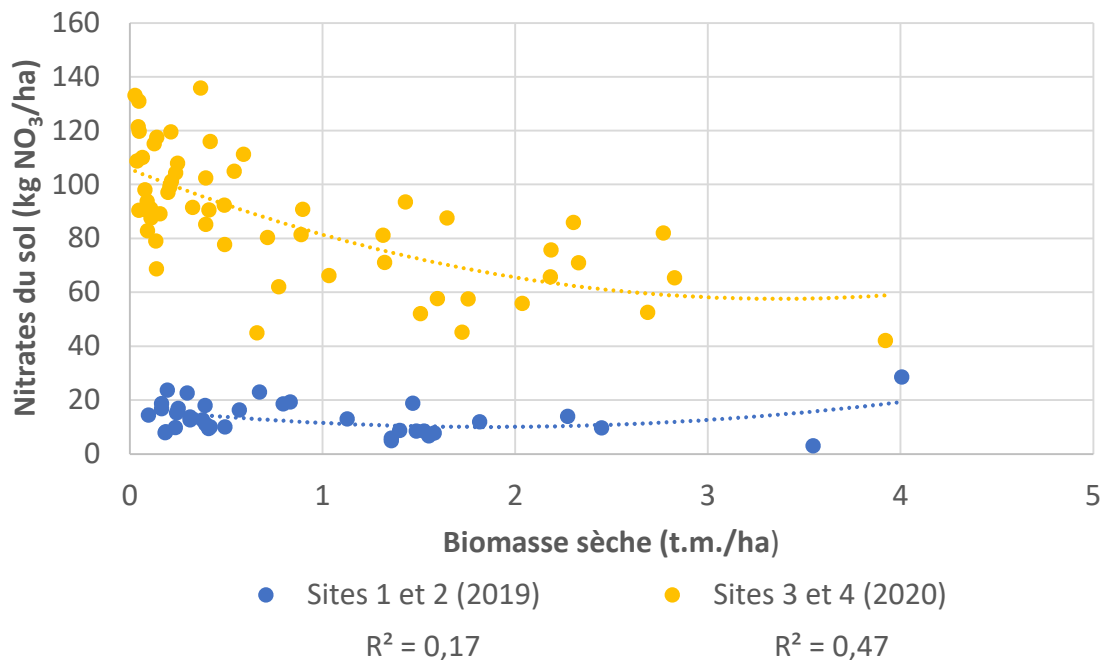


Figure 2. Nitrates du sol en automne en fonction de la biomasse de la CC

Au printemps, les nitrates étaient plus élevés dans les sites 1 et 2 par rapport à l'automne, mais sont demeurés stables dans les sites 3 et 4 (Annexe 4). La biomasse sèche semble prédictive des valeurs de nitrates au printemps ($R^2 = 0,33 - 0,46$), avec un effet d'année visible entre les sites 1 et 2 et les sites 3 et 4 (Fig. 3). Dans les sites 1 et 2, les nitrates étaient plus élevés dans les semis hâtifs (traitements impairs) que tardifs (traitements pairs), ce qui pourrait expliquer la meilleure corrélation entre la biomasse et les nitrates au printemps qu'à l'automne. Dans les sites 3 et 4, les semis hâtifs ont obtenu les plus faibles nitrates au printemps, sauf pour la vesce. Dans ces sites, la moins bonne relation entre la biomasse et les nitrates au printemps a sans doute été causée par la reprise du seigle (traitements 9 et 10) et des mauvaises herbes (surtout trèfle hâtif) au printemps, qui ont immobilisé une partie de l'azote disponible. Dans l'ensemble, cependant, les nitrates dépassaient rarement les valeurs obtenues dans le témoin sans CC, sauf dans le site 1 pour le trèfle et l'avoine hâtifs. Il semblerait donc que les CC permettent, au mieux, d'atteindre le même niveau de nitrates au printemps que sans CC, mais que dans plusieurs cas une partie de l'azote est immobilisée dans les résidus. Dans le site 4, l'azote immobilisé semble avoir été relâché

plus tard dans le cycle de l'oignon, les traitements impairs étant caractérisés par une forte hausse des nitrates entre avril et juin.

En résumé, la biomasse des CC semble être le facteur déterminant des nitrates du sol disponibles à l'automne et au printemps, et l'effet principal semble être une immobilisation de l'azote par les CC ou les résidus au printemps, suivie par une libération de l'azote dans les semaines suivant l'enfouissement des CC. Les conditions environnementales semblent cependant exercer une forte influence sur le phénomène, et la relation imparfaite entre les deux mesures rend donc difficile la prédiction de l'impact d'une CC sur la fertilité du sol durant la saison suivante.

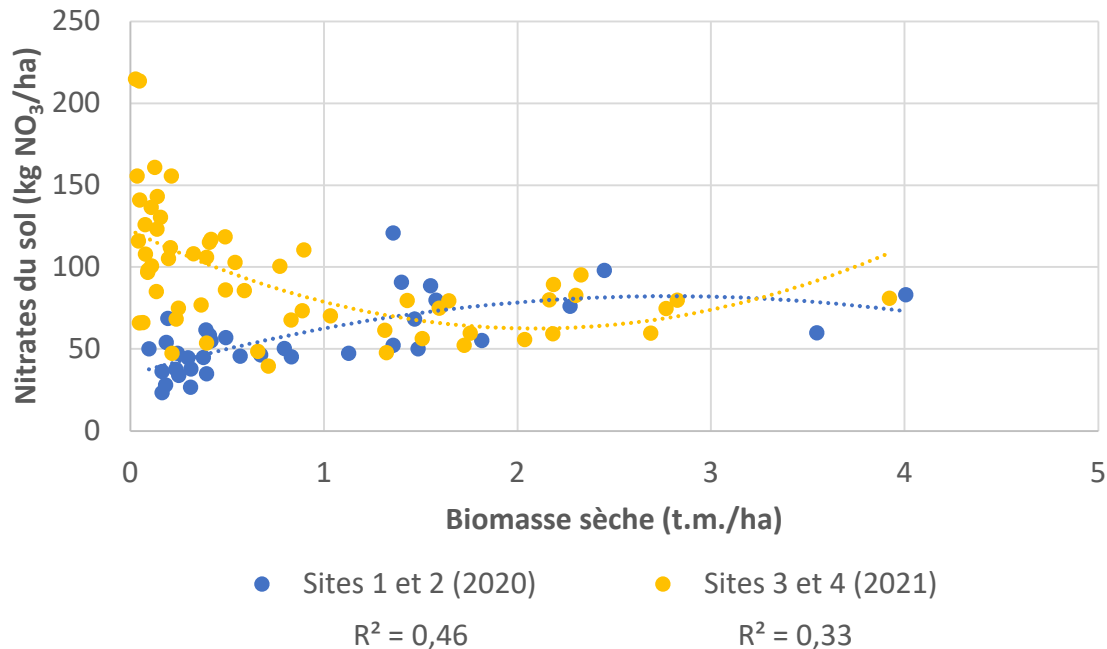


Figure 3. Nitrates du sol au printemps en fonction de la biomasse de la CC

Rendements

Les rendements vendables frais et secs, ainsi que le pourcentage de rejets, sont présentés à l'annexe 5. Le site 3 ayant été abandonné au printemps 2021, aucune donnée de rendements n'est présentée. Les rendements vendables étaient similaires à la normale de 70 t.m./ha dans tous les sites récoltés, sauf le site 4 (57 t.m./ha).

Des différences significatives entre les rendements ont été obtenues seulement dans le site 4. Aucun traitement n'a donné un rendement significativement supérieur au témoin non fertilisé. Il n'y avait pas non plus de lien apparent entre la fourniture azotée des CC et le rendement, ou entre les nitrates du sol au printemps et le rendement vendable pour les traitements 1 à 10 (Fig. 4), à l'exception du site 4 où des différences significatives ont été obtenues entre les rendements. Autant pour le rendement vendable frais que le rendement vendable sec, les cultures de couverture semées hâtivement (traitements impairs) ont obtenu un rendement inférieur au

témoin non fertilisé, à l'exception de la vesce commune. Ces traitements étaient caractérisés par de faibles teneurs en nitrates du sol au printemps suivies d'une forte hausse des nitrates entre avril et juin, comparés aux traitements semés hâtivement (traitements pairs). Les faibles rendements obtenus dans ces parcelles pourraient donc s'expliquer par un manque d'azote, immobilisé dans les résidus des CC, durant les premières semaines de croissance. La minéralisation des résidus dans les semaines suivantes n'aurait pas suffi à compenser le manque à gagner (Brewster et Butler, 1989). Le site 4 était cultivé en oignon planté avec une variété plutôt hâtive; dans l'oignon semé, la minéralisation des résidus aurait pu être plus synchronisée avec les besoins de la culture, qui sont décalés par rapport à ceux de l'oignon planté. De même, l'utilisation d'engrais minéral en début de saison aurait pu combler les besoins de la plante avant la minéralisation des résidus des CC. Ainsi, la contribution azotée des CC pourrait remplacer une partie ou la totalité de l'azote appliqué en post-plantation.

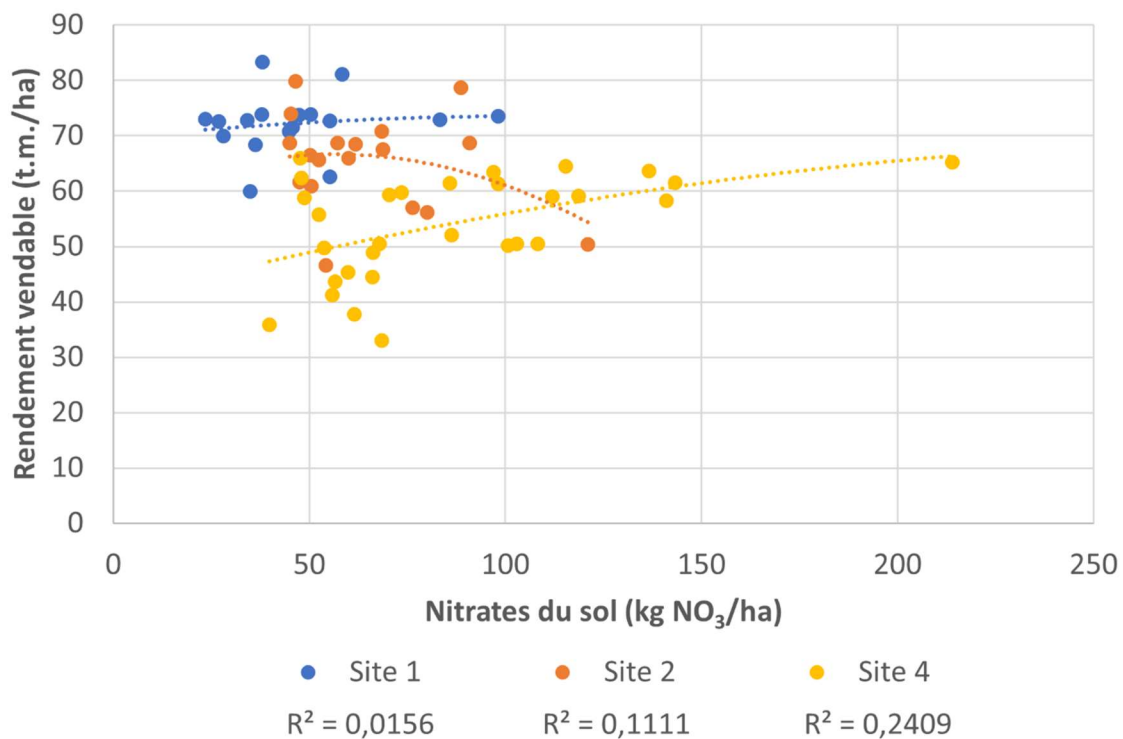


Figure 4. Rendement vendable en fonction des nitrates du sol au printemps, traitements 1 à 10

Des différences significatives ont aussi été obtenues au niveau des rejets d'oignons trop petits dans les sites 1 et 4. Dans le site 1, le trèfle tardif et le seigle hâtif avaient un taux de rejet plus élevé que la régie du producteur. Idem pour le pois, le trèfle et l'avoine hâtifs dans le site 4, ce qui expliquerait les faibles rendements dans ces traitements.

Les courbes dose-réponse entre les rendements vendables et les doses d'azote appliquées dans les traitements 11 à 14 (azote minéral seulement) n'ont pas permis de dégager de tendance claire entre la dose et le rendement (Annexe 6). La relation entre la dose d'azote et le rendement n'était pas cohérente entre les sites, les coefficients de détermination (R^2) variant de 0,13 à 0,41. La faible réponse de l'oignon sec à la fertilisation azotée en sols organiques a aussi été observée en 2018, 2019 et 2020 dans le projet 17-GES-10, qui visait la diminution des émissions de GES en sols

organiques par l'optimisation de la fertilisation azotée dans l'oignon sec. Ainsi, bien que la biomasse des CC semble prédictive des nitrates du sol à l'automne et au printemps, l'impact des CC sur les rendements d'oignon est difficilement appréciable puisque cette culture répond peu à l'azote. L'apport en azote des CC pourrait être plus facilement mesurable dans une culture plus sensible à l'azote comme la laitue.

Les valeurs d'ENM ont été calculées pour le site 1, qui offrait la courbe dose-réponse avec le meilleur coefficient R^2 (Tableau 2). Puisque les courbes dose-réponse des sites 2 et 4 sont peu concluantes, aucune valeur d'ENM n'a été calculée pour ces sites. On constate que la fourniture azotée théorique des CC ne correspond pas bien aux ENM calculés pour le site 1, ces derniers étant généralement largement supérieurs à l'azote total contenu dans les CC. Cette différence pourrait s'expliquer par des bénéfices autres que l'apport en azote par les CC, mais l'absence de différence significative entre les rendements du site 1, ainsi que les erreurs-types élevées des valeurs d'ENM, indiquent plutôt que l'ENM n'est pas une mesure fiable de l'impact des CC sur les rendements dans les cultures répondant peu à l'azote.

Tableau 2. Équivalent en azote minéral (ENM) des cultures de couverture enfouies avant le semis d'oignon sec (\pm erreur-type), site 1, 2020.

Traitement	ENM (kg N/ha)	Fourniture azotée (kg N/ha)
1 - Pois, fin août	73 \pm 62	69,23 \pm 9,75
2 - Pois, fin sept	54 \pm 42	9,41 \pm 0,40
3 - Vesce, mi-août	54 \pm 20	n.d.
4 - Vesce, début sept	131 \pm 19	20,52 \pm 3,97
5 - Trèfle, mi-août	55 \pm 46	n.d.
6 - Trèfle, mi-sept	40 \pm 7	13,90 \pm 2,28
7 - Avoine, début sept	121 \pm 14	96,60 \pm 24,12
8 - Avoine, fin sept	59 \pm 62	17,19 \pm 2,73
9 - Seigle, fin sept	21 \pm 63	n.d.
10 - Seigle, mi-oct	27 \pm 41	n.d.

Conclusion

Dans ce projet, l'effet de différentes cultures de couverture d'hiver sur le rendement de l'oignon sec en sols organiques a été évalué. Les résultats obtenus indiquent que la biomasse sèche des cultures de couverture en automne semble être un facteur important de la teneur en nitrates du sol à l'automne et au printemps, avant l'enfouissement des résidus. L'effet principal observé est le recyclage de l'azote résiduel en fin de saison et une immobilisation temporaire en début de saison suivante, suivie par une libération plutôt rapide (quelques semaines) d'une bonne partie de l'azote après l'enfouissement des résidus. Bien qu'aucun gain de rendement n'ait été obtenu grâce aux CC sans fertilisation azotée, les traitements ayant produit le plus de biomasse (pois, trèfle, avoine et seigle semés hâtivement) ont causé des pertes de rendement dans le site 4. Ces pertes auraient été causées par l'immobilisation de l'azote pendant les premières semaines de croissance de l'oignon. La minéralisation subséquente des résidus et la libération de l'azote n'auraient pas compensé ce manque à temps. L'application d'engrais azoté minéral en début de

saison pourrait permettre de combler les besoins de la culture durant les premières semaines de croissance, jusqu'à la minéralisation des résidus des CC qui pourrait remplacer l'application d'azote post-semis. Ces résultats suggèrent donc que l'apport azoté des CC d'hiver pourrait permettre de réduire la fertilisation azotée dans l'oignon sec en terre noire, à condition de mieux connaître le temps de libération de l'azote des résidus de CC par rapport aux besoins de la culture.

D'ailleurs, l'effet du sol sur la teneur en azote du feuillage des CC a été observé dans ce projet, la teneur en azote des CC étant plus élevée chez un producteur (sites 1 et 3) que chez l'autre (sites 2 et 4), mais ces différences n'ont pas eu d'impact sur les nitrates du sol, les conditions environnementales ayant eu un plus grand effet sur ceux-ci. Ces observations soulignent la difficulté d'obtenir des résultats significatifs dans les essais sur la fertilisation en sols organiques, à cause de la grande variation d'un site à l'autre et d'une année à l'autre. Ce type de projets devrait être réalisé sur plusieurs années, et possiblement sur le plus grand nombre de sites possibles, afin de mitiger ces variations. Le développement d'indicateurs fiables de la fertilité des sols organiques permettrait aussi de contourner ou de considérer la variation entre les sites dans l'analyse des résultats.

Ce projet confirme aussi que l'oignon sec répond peu ou pas à la fertilisation azotée en sols organiques, ce qui avait été observé dans le projet 17-GES-10. Quelques effets des CC ont été observés, notamment une réduction des rendements dans un site, mais la faible réponse de l'oignon à l'azote n'a pas permis de dégager de tendance générale. L'objectif du projet, qui était d'évaluer l'effet de différentes cultures de couverture d'hiver sur les rendements d'oignon en terre noire, a donc été partiellement atteint. D'un autre côté, l'objectif secondaire, qui était de déterminer l'équivalent en azote minéral (ENM) des cultures de couverture étudiées, n'a pas été atteint. Les valeurs calculées pour le site 1, qui obtenait la meilleure courbe dose-réponse dans ce projet, étaient très variables et ne pouvaient pas servir de recommandations. Considérant la faible sensibilité de l'oignon à l'azote, l'ENM des cultures de couverture pourrait être plus facilement mesurable dans une culture sensible à l'azote comme la laitue. Alternativement, des engrais verts de printemps auraient probablement plus d'impact sur les rendements de la culture, mais ne sont pas réalisables dans l'oignon sec puisque les semis sont effectués très tôt en saison.

Références

Brewster, J.L. et H.A. Butler. 1989. Effects of nitrogen supply on bulb development in onion *Allium cepa* L. *Journal of Experimental Botany*, 1989: 40-1155-1162.

Duguet, F. 2005. Minéralisation de l'azote et du phosphore dans les sols organiques cultivés du sud-ouest du Québec. Thèse, M. Sc., Université Laval, Québec, Canada.

ANNEXE 1

Dispositif expérimental

107	114	207	214	307	314
T10	T6	T3	T1	T2	T10
106	113	206	213	306	313
T3	T7	T12	T2	T14	T5
105	112	205	212	305	312
T14	T5	T4	T6	T1	T7
104	111	204	211	304	311
T12	T2	T11	T10	T6	T4
103	110	203	210	303	310
T1	T11	T8	T14	T9	T3
102	109	202	209	302	309
T9	T8	T5	T13	T12	T13
101	108	201	208	301	308
T13	T4	T9	T7	T11	T8

10 m

3 planches

ANNEXE 2

Calendrier des opérations

Opération		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4
Semis et échantillon de sols des CC	Traitements 1, 3, 5 et 11	2019-09-06	2019-09-06	2020-08-27	2020-09-03
	Traitements 2, 8 et 11	2019-06-25	2019-09-25	2020-10-01	2020-10-01
	Traitements 4, 7 et 11	2019-09-06	2019-09-06	2020-09-08	2020-09-07
	Traitements 6 et 11	2019-09-18	2019-09-18	2020-09-14	2020-09-14
	Traitements 9 et 11	2019-09-30	2019-09-30	2020-10-01	2020-10-01
	Traitements 10 et 11	2019-10-21	2019-10-21	2020-10-14	2020-10-14
Évaluation des biomasses CC		2019-11-11	2019-11-11	2020-11-05	2020-11-05
Fertilisation pré-semis		2020-04-30	2020-04-30	2021-04-16	2021-04-20
Semis		2020-05-12	2020-05-14	2021-04-27	2021-04-28
Azote post-semis		2020-06-18	2020-06-18	N/A	2021-06-01
Évaluation récolte		2020-08-26	2020-08-28	N/A	2021-07-28
Échantillons de sols, traitements 1 à 11	Automne	2019-11-11	2019-11-11	2020-11-05	2020-11-05
	Printemps	2020-04-23	2020-04-23	2021-04-15	2021-04-15
Échantillons de sols, traitements 1 à 11 et 13	2F	2020-06-18	2020-06-18	N/A	2021-06-01
	DB	2020-07-28	2020-07-10	N/A	2021-06-30
	Récolte	2020-08-31	2020-08-31	N/A	2021-07-28

ANNEXE 3

Tableau 3. Biomasse sèche, concentration en azote total et fourniture azotée du feuillage des cultures de couverture (\pm erreur-type), site 1, automne 2019.

Traitements	Biomasse sèche (t.m./ha)*	%Ntot	Fourniture azotée (kg N/ha)*
1 - Pois, fin août	1,48 \pm 0,20 b	4,68 \pm 0,12 b	69,23 \pm 9,75 a
2 - Pois, fin sept	0,17 \pm 0,01 c	5,51 \pm 0,07 a	9,41 \pm 0,40 c
4 - Vesce, début sept	0,43 \pm 0,07 c	4,74 \pm 0,13 b	20,52 \pm 3,97 b
6 - Trèfle, mi-sept	0,32 \pm 0,05 c	4,31 \pm 0,06 c	13,90 \pm 2,28 bc
7 - Avoine, début sept	2,66 \pm 0,72 a	3,68 \pm 0,09 d	96,60 \pm 24,12 a
8 - Avoine, fin sept	0,31 \pm 0,05 c	5,45 \pm 0,07 a	17,19 \pm 2,73 bc
	P < 0,0001	P < 0,0001	P < 0,0001

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes ($\alpha=0,05$, test LSD de Fisher)

* ANOVA effectuées sur les données transformées en Log (x+1) mais ce sont les moyennes non transformées qui sont présentées dans le tableau.

Tableau 4. Biomasse sèche, concentration en azote total et fourniture azotée du feuillage des cultures de couverture (\pm erreur-type), site 2, automne 2019.

Traitements	Biomasse sèche (t.m./ha)*	%Ntot	Fourniture azotée (kg N/ha)
1 - Pois, fin août	1,50 \pm 0,07 a	3,90 \pm 0,45 ab	58,13 \pm 6,80 a
2 - Pois, fin sept	0,17 \pm 0,04 b	4,41 \pm 0,44 a	7,36 \pm 1,23 c
4 - Vesce, début sept	0,92 \pm 0,29 ab	2,21 \pm 0,32 c	20,57 \pm 6,58 bc
6 - Trèfle, mi-sept	1,86 \pm 0,87 a	3,04 \pm 0,39 bc	49,93 \pm 16,63 ab
7 - Avoine, début sept	1,50 \pm 0,42 a	3,87 \pm 0,84 ab	53,47 \pm 11,65 a
8 - Avoine, fin sept	0,32 \pm 0,06 b	4,70 \pm 0,22 a	14,79 \pm 2,49 c
	P = 0,021	P = 0,014	P = 0,016

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes ($\alpha=0,05$, test LSD de Fisher)

* ANOVA effectuées sur les données transformées en Log (x+1) mais ce sont les moyennes non transformées qui sont présentées dans le tableau.

Tableau 5. Biomasse sèche, concentration en azote total et fourniture azotée du feuillage des cultures de couverture (\pm erreur-type), site 3, automne 2020.

Traitements	Biomasse sèche (t.m./ha)*	%Ntot	Fourniture azotée (kg N/ha)*
1 - Pois, fin août	2,98 \pm 0,51 a	4,76 \pm 0,23 bc	139,90 \pm 18,57 a
2 - Pois, fin sept	0,06 \pm 0,02 d	6,08 \pm 0,19 a	3,47 \pm 1,35 ef
3 - Vesce, mi-août	1,73 \pm 0,22 b	4,40 \pm 0,19 cde	75,61 \pm 7,47 b
4 - Vesce, début sept	0,57 \pm 0,16 c	4,01 \pm 0,17 ef	23,27 \pm 7,54 c
5 - Trèfle, mi-août	2,06 \pm 0,36 b	3,29 \pm 0,16 g	67,38 \pm 11,26 b
6 - Trèfle, mi-sept	0,16 \pm 0,02 d	3,46 \pm 0,20 g	5,58 \pm 0,45 de
7 - Avoine, début sept	2,27 \pm 0,04 ab	3,67 \pm 0,08 fg	83,42 \pm 2,42 ab
8 - Avoine, fin sept	0,16 \pm 0,03 d	4,48 \pm 0,01 cd	7,10 \pm 1,20 d
9 - Seigle, fin sept	0,24 \pm 0,07 d	4,26 \pm 0,15 de	10,19 \pm 3,09 d
10 - Seigle, mi-oct	0,05 \pm 0,02 d	5,16 \pm 0,09 b	2,54 \pm 0,83 f
	P < 0,0001	P < 0,0001	P < 0,0001

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes ($\alpha=0,05$, test LSD de Fisher)

* ANOVA effectuées sur les données transformées en Log (x+1) mais ce sont les moyennes non transformées qui sont présentées dans le tableau.

Tableau 6. Biomasse sèche, concentration en azote total et fourniture azotée du feuillage des cultures de couverture (\pm erreur-type), site 4, automne 2020.

Traitements	Biomasse sèche (t.m./ha)*	%Ntot	Fourniture azotée (kg N/ha)*
1 - Pois, fin août	1,14 \pm 0,18 b	3,6 \pm 0,19 d	40,3 \pm 5,08 ab
2 - Pois, fin sept	0,08 \pm 0,03 f	5,83 \pm 0,12 a	4,92 \pm 2,12 ef
3 - Vesce, mi-août	0,92 \pm 0,06 b	2,94 \pm 0,23 ef	27,19 \pm 3,79 bc
4 - Vesce, début sept	0,52 \pm 0,03 c	4,19 \pm 0,22 c	22,06 \pm 2,35 c
5 - Trèfle, mi-août	0,96 \pm 0,27 b	2,75 \pm 0,3 ef	26,39 \pm 7,59 c
6 - Trèfle, mi-sept	0,43 \pm 0,06 cd	3,32 \pm 0,09 de	14 \pm 1,66 d
7 - Avoine, début sept	2,15 \pm 0,28 a	2,65 \pm 0,19 f	57,67 \pm 10,12 a
8 - Avoine, fin sept	0,14 \pm 0,04 ef	4,49 \pm 0,07 bc	6,1 \pm 1,61 e
9 - Seigle, fin sept	0,28 \pm 0,06 de	4,34 \pm 0,18 c	12,06 \pm 1,9 d
10 - Seigle, mi-oct	0,06 \pm 0,01 f	4,94 \pm 0,14 b	3,03 \pm 0,69 f
	P < 0,0001	P < 0,0001	P < 0,0001

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes ($\alpha=0,05$, test LSD de Fisher)

* ANOVA effectuées sur les données transformées en Log (x+1) mais ce sont les moyennes non transformées qui sont présentées dans le tableau.

ANNEXE 4

Tableau 7. Nitrates du sol en kg NO₃/ha (\pm erreur-type), site 1, 2019-2020.

Traitement	2019-11-11	2020-04-23	2020-06-18	2020-07-28	2020-08-31
1 - Pois, fin août	11,2 \pm 1,4	51 \pm 2,3 c	107,4 \pm 15,3	13,6 \pm 1,8	13,9 \pm 1,9
2 - Pois, fin sept	14,6 \pm 3,3	29,3 \pm 3,7 d	96,8 \pm 16,8	14,2 \pm 1,2	12,9 \pm 2,4
3 - Vesce, mi-août	16,3 \pm 3,6	41 \pm 2,5 cd	123,3 \pm 34	23,2 \pm 3,9	15,8 \pm 4,1
4 - Vesce, début sept	13,3 \pm 2	43,7 \pm 9,2 cd	123,2 \pm 22,3	8,1 \pm 2,7	16,6 \pm 3,3
5 - Trèfle, mi-août	11 \pm 0,5	68,1 \pm 5 b	162,9 \pm 20,2	25,5 \pm 10,5	16,1 \pm 1,9
6 - Trèfle, mi-sept	16,6 \pm 3,6	44,7 \pm 6,1 cd	118,4 \pm 18,9	9,7 \pm 0,7	13,9 \pm 0,8
7 - Avoine, début sept	15,7 \pm 6,5	90,7 \pm 7,4 a	155,9 \pm 43,1	30,1 \pm 11,4	22,8 \pm 7
8 - Avoine, fin sept	11,2 \pm 0,8	36,9 \pm 1 cd	106,1 \pm 17,3	15,3 \pm 5,2	13,7 \pm 2
9 - Seigle, fin sept	11,1 \pm 5	38 \pm 5,8 cd	129,5 \pm 29,7	24,7 \pm 1,2	12,6 \pm 1,9
10 - Seigle, mi-oct	12,7 \pm 3,8	35,5 \pm 4,7 cd	109,1 \pm 19,5	19,9 \pm 5,2	12,3 \pm 0,9
11 - 0 kg N/ha	16,2*	38,2	128,1	20,3	21,2
13 - 130 kg N/ha			143,7 \pm 26,3	48,8 \pm 7,1	22,1 \pm 4,4
	P = 0,924	P < 0,0001			

*Données non utilisées dans l'ANOVA.

Tableau 8. Nitrates du sol en kg NO₃/ha (\pm erreur-type), site 2, 2019-2020.

Traitement	2019-11-11	2020-04-23	2020-07-10	2020-08-31
1 - Pois, fin août	6,9 \pm 0,6 cde	96,5 \pm 12,5 a	95,7 \pm 33,9	27 \pm 4
2 - Pois, fin sept	12,8 \pm 2,2 abcd	50,6 \pm 2 bc	80,6 \pm 16,7	19,6 \pm 1,1
3 - Vesce, mi-août	4,6 \pm 1,1 e	67,9 \pm 16,6 bc	108,4 \pm 29	25,6 \pm 1,3
4 - Vesce, début sept	15,9 \pm 2,9 ab	58,7 \pm 5,2 bc	70 \pm 12,5	24,3 \pm 0,7
5 - Trèfle, mi-août	5,5 \pm 0,9 de	76,9 \pm 5,8 ab	96,6 \pm 3	24,8 \pm 1,3
6 - Trèfle, mi-sept	10,4 \pm 6,4 bcde	53 \pm 3,9 bc	83,9 \pm 18,4	19,5 \pm 2,6
7 - Avoine, début sept	14,1 \pm 3,1 abc	70,9 \pm 13,4 abc	105,3 \pm 14	24,7 \pm 1,1
8 - Avoine, fin sept	18,2 \pm 3,2 a	58,5 \pm 7 bc	61,7 \pm 9,9	23 \pm 1
9 - Seigle, fin sept	10,1 \pm 1,3 bcde	45,4 \pm 7 c	93,7 \pm 9,6	21,1 \pm 4,3
10 - Seigle, mi-oct	14,1 \pm 3,6 abc	46,1 \pm 1,8 c	148,2 \pm 12,8	23,2 \pm 1,5
11 - 0 kg N/ha	5,6	76,4	111,1	17
13 - 130 kg N/ha			259,8 \pm 30,2	42 \pm 6,9
	P = 0,014	P = 0,018		

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes ($\alpha=0,05$, test LSD de Fisher)

Tableau 9. Nitrates du sol en kg NO₃/ha (\pm erreur-type), site 3, 2020-2021.

Traitement	2020-11-05	2021-04-15*
1 - Pois, fin août	61,1 \pm 9,9 c	83,6 \pm 3 de
2 - Pois, fin sept	102,9 \pm 6 ab	131,1 \pm 13 abc
3 - Vesce, mi-août	75,7 \pm 17,9 bc	78,3 \pm 1,7 e
4 - Vesce, début sept	103,2 \pm 7,3 ab	111,3 \pm 3,1 bc
5 - Trèfle, mi-août	75,8 \pm 9,2 bc	71,4 \pm 5,9 e
6 - Trèfle, mi-sept	88,6 \pm 5,2 abc	107 \pm 13,1 cd
7 - Avoine, début sept	74,3 \pm 6,1 bc	79,3 \pm 10,5 e
8 - Avoine, fin sept	101,2 \pm 16,3 ab	146,7 \pm 11,8 a
9 - Seigle, fin sept	110,5 \pm 14 a	84,3 \pm 8,3 de
10 - Seigle, mi-oct	117,6 \pm 10,3 a	146,4 \pm 34,4 ab
11 - 0 kg N/ha	87,6	134,1
	P = 0,013	P < 0,0001

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes ($\alpha=0,05$, test LSD de Fisher)

* ANOVA effectuées sur les données transformées en Log (x+1) mais ce sont les moyennes non transformées qui sont présentées dans le tableau.

Tableau 10. Nitrates du sol en kg NO₃/ha (\pm erreur-type), site 4, 2020-2021.

Traitement	2020-11-05	2021-04-15*	2021-06-01	2021-06-30
1 - Pois, fin août	71,6 \pm 5,5 de	70 \pm 15,8 cd	150,7 \pm 41,7	54,7 \pm 6,4
2 - Pois, fin sept	119,6 \pm 6,1 a	141,2 \pm 42,6 a	138,5 \pm 21	49,2 \pm 6,3
3 - Vesce, mi-août	73,9 \pm 7,6 cde	70,6 \pm 1,6 bcd	144,9 \pm 19,7	49,8 \pm 8,5
4 - Vesce, début sept	93,9 \pm 9,7 bc	97 \pm 10,9 abc	92,8 \pm 15,4	47,3 \pm 6,5
5 - Trèfle, mi-août	59,2 \pm 10,8 e	48,3 \pm 4,9 d	98,2 \pm 18,7	44,5 \pm 7,4
6 - Trèfle, mi-sept	95,8 \pm 4,6 bc	108,8 \pm 3,6 ab	123,3 \pm 10	60,6 \pm 15,4
7 - Avoine, début sept	51,3 \pm 3,2 e	56 \pm 2,1 d	88,7 \pm 21,6	45,8 \pm 5,1
8 - Avoine, fin sept	91,2 \pm 4,7 bcd	115,6 \pm 11,2 a	117,3 \pm 13,2	42,8 \pm 4,8
9 - Seigle, fin sept	97,1 \pm 5,9 bc	56,6 \pm 6,2 d	167,6 \pm 15	132,9 \pm 17,5
10 - Seigle, mi-oct	101,4 \pm 9,3 ab	101,4 \pm 21,8 abc	125,1 \pm 31,2	52,3 \pm 2,9
11 - 0 kg N/ha	106,7	150,1	138,9	92,7
13 - 130 kg N/ha			274,4 \pm 31,4	263,8 \pm 109,2
	P = 0,0002	P = 0,002		

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes ($\alpha=0,05$, test LSD de Fisher)

* ANOVA effectuées sur les données transformées en Log (x+1) mais ce sont les moyennes non transformées qui sont présentées dans le tableau.

ANNEXE 5

Tableau 11. Rendements vendables frais et sec (en t.m./ha), et pourcentage de rejets d'oignons trop petits (\pm erreur-type), site 1, 2020.

Traitements	Rendement vendable	Rendement sec	% rejets petits
1 - Pois, fin août	70,06 \pm 3,74	9,88 \pm 0,47	4,81 \pm 1,12 bcde
2 - Pois, fin sept	70,44 \pm 1,37	9,87 \pm 0,25	6,57 \pm 0,15 bc
3 - Vesce, mi-août	73,69 \pm 2,02	9,72 \pm 0,45	2,19 \pm 0,08 e
4 - Vesce, début sept	75,06 \pm 3,03	10,06 \pm 0,2	5,14 \pm 0,29 bcde
5 - Trèfle, mi-août	69,92 \pm 1,41	9,66 \pm 0,15	4,64 \pm 0,97 bcde
6 - Trèfle, mi-sept	72,09 \pm 0,63	9,97 \pm 0,03	6,81 \pm 0,96 ab
7 - Avoine, début sept	75,07 \pm 1,90	10,44 \pm 0,37	5,77 \pm 1,28 bcd
8 - Avoine, fin sept	72,37 \pm 6,78	10,30 \pm 1,03	5,50 \pm 1,21 bcd
9 - Seigle, fin sept	69,99 \pm 5,05	10,21 \pm 0,53	9,75 \pm 1,36 a
10 - Seigle, mi-oct	70,14 \pm 3,82	9,04 \pm 0,24	3,82 \pm 1,53 cde
11 - 0 kg N/ha	68,10 \pm 1,27	9,73 \pm 0,35	5,78 \pm 1,15 bcd
12 - 65 kg N/ha	71,88 \pm 4,10	9,42 \pm 0,22	5,30 \pm 1,50 bcd
13 - 130 kg N/ha	75,83 \pm 2,82	10,96 \pm 0,50	3,40 \pm 0,66 de
14 - 195 kg N/ha	66,43 \pm 0,36	9,41 \pm 0,35	2,85 \pm 0,42 de
Producteur	83,04 \pm 1,82	10,42 \pm 0,18	2,82 \pm 0,54 de
	<i>P</i> = 0,147	<i>P</i> = 0,238	<i>P</i> = 0,003

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes ($\alpha=0,05$, test LSD de Fisher)

Tableau 12. Rendements vendables frais et sec (en t.m./ha), et pourcentage de rejets d'oignons trop petits (\pm erreur-type), site 2, 2020.

Traitements	Rendement vendable	Rendement sec	% rejets petits
1 - Pois, fin août	61,72 \pm 8,65	6,51 \pm 0,89	3,29 \pm 2,83
2 - Pois, fin sept	58,21 \pm 5,98	6,04 \pm 0,92	1,99 \pm 0,51
3 - Vesce, mi-août	69,94 \pm 1,84	7,09 \pm 0,37	1,65 \pm 0,39
4 - Vesce, début sept	66,76 \pm 3,01	7,85 \pm 1,21	1,15 \pm 0,60
5 - Trèfle, mi-août	69,02 \pm 6,22	8,12 \pm 0,49	0,91 \pm 0,68
6 - Trèfle, mi-sept	70,44 \pm 4,70	6,87 \pm 0,77	1,21 \pm 0,65
7 - Avoine, début sept	66,52 \pm 5,00	8,19 \pm 1,02	2,24 \pm 0,60
8 - Avoine, fin sept	68,24 \pm 0,34	7,84 \pm 1,09	1,02 \pm 0,28
9 - Seigle, fin sept	63,65 \pm 3,16	7,56 \pm 0,62	1,11 \pm 0,07
10 - Seigle, mi-oct	69,29 \pm 4,66	8,24 \pm 1,19	1,28 \pm 0,64
11 - 0 kg N/ha	66,27 \pm 3,44	7,52 \pm 1,21	1,77 \pm 0,65
12 - 65 kg N/ha	67,46 \pm 1,59	7,24 \pm 1,12	0,56 \pm 0,33
13 - 130 kg N/ha	64,48 \pm 3,33	6,97 \pm 1,32	1,55 \pm 0,57
14 - 195 kg N/ha	72,87 \pm 2,22	8,59 \pm 0,56	0,82 \pm 0,33
Producteur	76,33 \pm 2,13	7,42 \pm 0,96	0,66 \pm 0,13
	P = 0,350	P = 0,144	P = 0,734

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes ($\alpha=0,05$, test LSD de Fisher)

Tableau 13. Rendements vendables frais et sec (en t.m./ha), et pourcentage de rejets d'oignons trop petits (\pm erreur-type), site 4, 2021.

Traitements	Rendement vendable	Rendement sec	% rejets petits
1 - Pois, fin août	50,1 \pm 7,11 def	7,27 \pm 0,67 def	7,98 \pm 4,28 abc
2 - Pois, fin sept	58,53 \pm 4,93 bcd	7,89 \pm 0,65 cdef	5,15 \pm 0,46 bc
3 - Vesce, mi-août	56,51 \pm 3,01 bcdef	7,76 \pm 0,29 cdef	5,97 \pm 0,49 bc
4 - Vesce, début sept	57,54 \pm 2,84 bcde	7,96 \pm 0,34 cde	2,84 \pm 0,65 c
5 - Trèfle, mi-août	46,10 \pm 6,74 f	6,81 \pm 0,83 ef	13,71 \pm 4,28 a
6 - Trèfle, mi-sept	55,14 \pm 4,66 cdef	7,78 \pm 0,62 cdef	6,37 \pm 2,53 bc
7 - Avoine, début sept	47,39 \pm 4,32 ef	6,56 \pm 0,64 f	9,71 \pm 0,78 ab
8 - Avoine, fin sept	61,30 \pm 1,33 abc	7,92 \pm 0,17 cde	5,33 \pm 1,61 bc
9 - Seigle, fin sept	49,57 \pm 9,49 def	6,89 \pm 1,05 ef	5,30 \pm 2,45 bc
10 - Seigle, mi-oct	55,37 \pm 5,67 cdef	7,60 \pm 0,54 cdef	3,54 \pm 1,81 c
11 - 0 kg N/ha	62,31 \pm 7,32 abc	8,91 \pm 0,93 abc	3,36 \pm 1,87 c
12 - 65 kg N/ha	64,76 \pm 4,13 abc	8,56 \pm 0,46 abcd	5,02 \pm 2,30 bc
13 - 130 kg N/ha	69,51 \pm 2,66 a	9,48 \pm 0,42 ab	2,75 \pm 0,28 c
14 - 195 kg N/ha	67,07 \pm 1,66 ab	9,63 \pm 0,38 a	2,68 \pm 1,09 c
Producteur	61,71 \pm 4,16 abc	8,24 \pm 0,52 bcd	3,59 \pm 1,84 c
	P = 0,002	P = 0,0003	P = 0,046

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes ($\alpha=0,05$, test LSD de Fisher)

ANNEXE 6

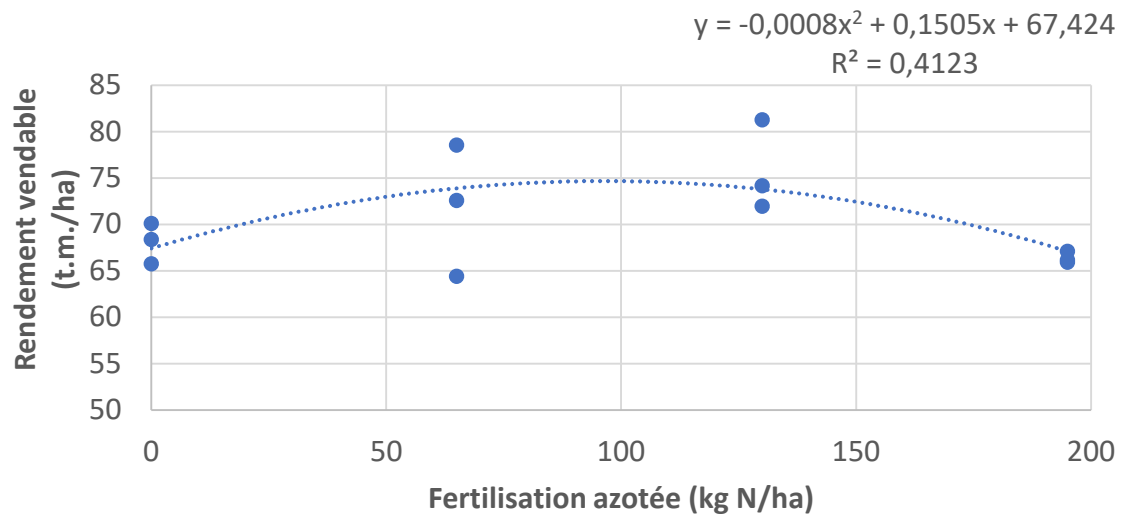


Figure 5. Rendement vendable selon la dose d'engrais azoté minéral appliquée, et courbe de tendance, site 1, 2020.

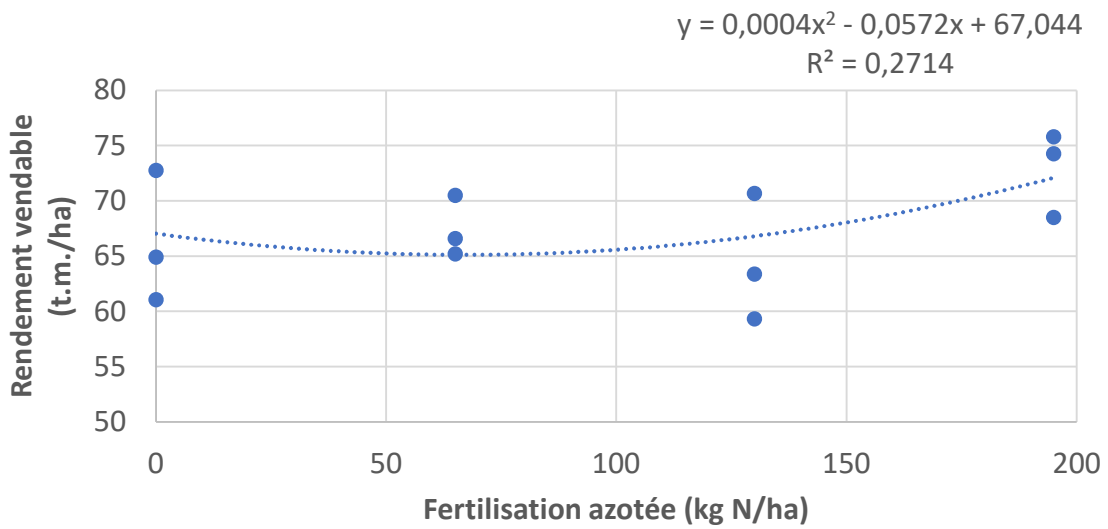


Figure 6. Rendement vendable selon la dose d'engrais azoté minéral appliquée, et courbe de tendance, site 2, 2020.

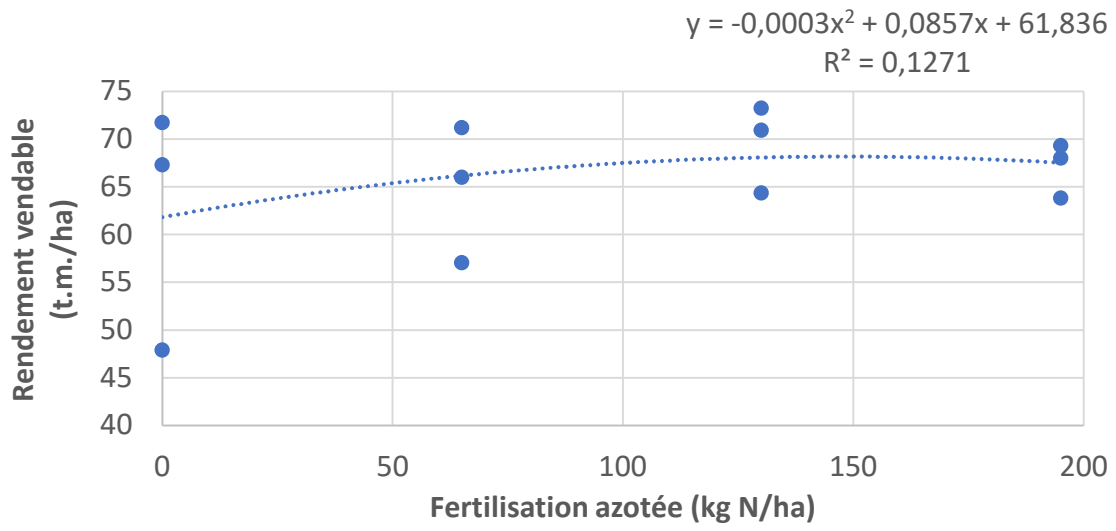


Figure 7. Rendement vendable selon la dose d'engrais azoté minéral appliquée, et courbe de tendance, site 4, 2021.