

**PROGRAMME D'APPUI À LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LE
SECTEUR BIOALIMENTAIRE**

TITRE DU PROJET

**Impact des cultures de couverture sur les émissions de protoxyde d'azote au Québec :
revue de littérature**

NUMÉRO DU PROJET

22-004-PALCCB-CEROM

DURÉE DU PROJET : 03-2023 / 01-2025

RAPPORT FINAL

Réalisé par :

Dalel Abdi, Ph.D., CÉROM

JANVIER 2025

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

Impact des cultures de couverture sur les émissions de protoxyde d'azote au Québec : revue de littérature

RÉSUMÉ DU PROJET

Les cultures de couverture (CC) offrent plusieurs bénéfices au niveau de la santé du sol, des rendements de cultures et de la réduction des pertes des éléments nutritifs notamment l'azote. Cependant, leurs effets sur les émissions du protoxyde d'azote (N_2O), un gaz à effet de serre (GES) très puissant, sont très variables. Quoique ces effets aient été mesurés dans différentes zones climatiques au monde, ils sont beaucoup moins documentés dans les conditions agronomiques et pédoclimatiques du Québec.

L'objectif général de ce projet était de faire une revue de littérature sur l'impact des CC (dérobées, intercalaires ou de pleine saison) sur les émissions de N_2O au Québec. Les objectifs spécifiques consistaient à documenter l'état actuel des connaissances sur ce sujet au Québec, à mieux comprendre comment les CC agissent sur les émissions directes et indirectes de N_2O et à identifier les besoins futurs en recherche sur ce sujet. Ce projet visait aussi à développer un outil d'aide à la décision sous forme de modèle de prédiction des émissions de N_2O dans les systèmes intégrant des CC au Québec.

Les études portant sur cette thématique au Québec et dans les régions en climat similaire, achevées ou en cours, ont été recensées. Des données ont été extraites à partir des études publiées ou collectées directement des auteurs afin de développer un modèle de prédiction.

Dans cette revue, on a identifié uniquement quatre études au Québec qui ont quantifié les émissions de N_2O dans des systèmes intégrant des CC, dont deux sont en cours de réalisation. L'analyse des résultats de ces études en lien avec la littérature effectuée pour les régions en climat tempéré humide a révélé des impacts divergents des CC sur les flux de N_2O . En général, les CC sont capables de réduire les émissions de N_2O au début de leur saison de croissance, par prélèvement de nitrates dans le sol. Cependant, des importants pics de N_2O peuvent survenir à la fin du cycle de CC suite à leur minéralisation, spécifiquement en période de dégel au printemps. Cet impact dépend fortement de l'espèce de CC, de sa biomasse et de son mode d'intégration dans la rotation culturale. Avec leurs faibles rapport carbone/azote (C/N), les résidus d'une CC-légumineuse se minéralisent plus rapidement qu'une graminée ou autre espèce de CC en conditions du sol favorables à la dénitrification, dégageant ainsi des importants flux de N_2O . Par ailleurs, malgré leur pouvoir d'absorption de nitrates au début de leur saison de croissance, les graminées peuvent émettre aussi d'importants flux de N_2O dépendamment de leur biomasse et du mode de leur destruction. Des facteurs externes comme les précipitations et les propriétés du sol (humidité, température, structure, texture) peuvent affecter cet impact. Il ressort aussi de cette revue que des pratiques culturales, principalement le type du travail du sol, la gestion des résidus de CC et la fertilisation azotée, affectent majoritairement l'influence des CC sur la production de N_2O .

L'évaluation de la performance du modèle de processus *DeNitrification-DeComposition* (version canadienne; DNDCv.Can) dans l'estimation des émissions cumulatives de N_2O dans un système intégrant des CC au Québec a révélé un potentiel prometteur à son utilisation dans le contexte agropédoclimatique du Québec. Malgré la complexité des données agronomiques et pédologiques collectées et la diversité des pratiques culturales, le développement d'un modèle empirique de prédiction de N_2O , tenant compte de plusieurs éléments du système intégrant des CC, s'avère encourageant.

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

1. Objectifs :

1. Documenter les connaissances actuelles en identifiant les pratiques agricoles et les facteurs influençant l'impact des CC sur les émissions de N_2O au Québec;
2. Discuter l'implication de ces résultats dans une gestion agronomique et environnementale durable dans les conditions spécifiques du Québec et identifier les lacunes dans les connaissances actuelles et le besoin en recherche dans ce domaine au Québec;
3. Établir un outil d'aide à la décision dans le choix des pratiques culturales en lien avec les CC spécifique au Québec à travers le développement ou l'évaluation d'un modèle de prédiction des émissions de N_2O .

2. Méthodologie :

2.1. Recensement des études

Afin de documenter l'état de connaissances sur l'impact des CC sur les émissions de N_2O au Québec, nous avons contacté plusieurs intervenants dans le secteur agricole, dont les grandes cultures et les cultures maraîchères. Plus précisément, nous avons contacté les organisations suivantes : Université Laval, Université McGill, Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité (CETAB+), Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Agrinova, Association des producteurs maraîchers du Québec (APMQ), Consortium de recherche sur la pomme de terre du Québec (CRPTQ) et l'Union des producteurs agricoles (UPA). Une demande de recherche bibliographique a été faite auprès de la bibliothèque Cécile-Rouleau.

Un recensement des études publiées sur cette thématique a été aussi fait au moyen des moteurs de recherche (Google et Google scholar) et des bases de données scientifiques (PubMed, Web of Science, JSTOR, CABI Digital Library, et Omni). Dans leur recherche des études, la bibliothèque Cécile-Rouleau a utilisé les bases de données suivantes : Academic Search Premier, AGRICOLA, Agri-Réseau, Agris (FAO), AgroParis Tech, CAB Abstracts, National Agricultural Library, National Agricultural Library Digital Collections, Open Access Theses and Dissertations, PubAg, PubMed, ScienceDirect, Taylor & Francis Online. Les principaux mots-clés utilisés étaient : culture de couverture (cover crops, catch crops), engrais vert (green manures), protoxyde d'azote, gaz à effet de serre, grandes cultures, cultures maraîchères, horticulture, Québec, climat tempéré humide. Une recherche utilisant les mêmes mots-clés traduits en anglais a été effectuée. Une recherche plus large a été menée pour les régions en climat tempéré humide (autres provinces canadiennes, États-Unis d'Amérique, Europe) pour mieux comprendre l'impact des CC sur les émissions de N_2O dans des conditions climatiques semblables à celles du Québec. Des chercheurs d'AAC, de l'Université Guelph, University of Illinois, ainsi que les Producteurs de grains de l'Ontario ont été contactés. Des chercheurs et organismes d'autres provinces canadiennes et aux États-Unis ont été contactés pour vérifier s'ils possèdent des données sur ce sujet, provenant de sites au Québec.

2.2. Modélisation des émissions de N₂O dans des systèmes intégrant des CC

2.2.1. Développement d'un modèle empirique de prédiction des émissions de N₂O dans des systèmes intégrant des CC au Québec

Afin de développer un modèle de prédiction des émissions de N₂O pour des systèmes agricoles intégrant des CC qui pourrait être utilisé au Québec, des données ont été collectées directement des auteurs ou extraites des articles scientifiques publiés à l'aide du logiciel académique WebPlotDigitizer v.4-6. Par la suite, ces données ont été classées par site, culture principale, pratiques culturales (type de CC et modes d'implantation et de destruction, travail du sol, fertilisation, rotation), texture du sol, période de mesure du N₂O (saison de croissance, hors saison de croissance), etc.

Toutes les figures et les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R, version 4.2.2 (R Core Team, 2024) dans la plateforme RStudio (R Core Team, 2024). Avant de procéder aux analyses, les données ont été explorées visuellement suivant le protocole décrit dans Zuur et al. (2010). Les émissions cumulées de N₂O ont été ensuite normalisées à l'aide d'une transformation logarithmique. Deux méthodes statistiques ont été utilisées afin de développer le meilleur modèle possible, soient la méthode des modèles mixtes linéaires et la méthode des arbres de régression « boostés ».

a) Modèles linéaires

Les données de N₂O transformées ont d'abord été analysées à l'aide de modèles mixtes linéaires [*Linear Mixed Models* ou LMM; fonction `lme4::lmer()` (Bates et al., 2015)] avec distribution normale de l'erreur et une fonction de lien identité. Une telle approche par modèle mixte permet de tenir compte de la non-indépendance des observations (pseudoréplication) (Pinheiro & Bates 2000; Bolker 2009).

Un premier modèle a été développé en utilisant comme effets principaux toutes les variables explicatives (texture du sol, type du travail du sol, culture commerciale, type de fertilisation, apports d'engrais azotés, période de fertilisation azotée, famille de CC, période de semis de CC, période de destruction de CC, période d'incorporation de CC, période et durée de mesure de N₂O) sans interactions, et en utilisant la source des données (c.à.d. l'étude) comme ordonnée à l'origine aléatoire. Une procédure de sélection automatique basée sur l'AIC [*stepwise model selection*; fonction `cAIC4::stepcAIC()`] a ensuite été appliquée afin de sélectionner les variables les plus importantes. Les facteurs d'inflation de la variance [*Variance Inflation Factor* ou VIF; fonction `performance::check_collinearity()`] calculés pour chacun des termes du modèle résultant ont cependant montré des problèmes de multicolinéarité entre certaines variables prédictives.

Un second modèle réduit a donc été développé en utilisant uniquement comme effets fixes la texture de sol, le type de travail de sol, le type de CC, l'apport en azote, et la période de mesure.

Tous les modèles ont été ajustés par maximum de vraisemblance (ML) et les effets principaux étaient testés à l'aide de tests du rapport de vraisemblance [*Likelihood Ratio Test* ou LRT ; fonction `car::Anova()`]. L'ajustement des modèles a été mesuré à l'aide des coefficients de détermination R^2 marginaux et conditionnels calculés suivant la méthode de Nakagawa [fonction `MuMIn::r.squaredGLMM()`]. Le R^2 marginal représente la proportion de la variance expliquée par les effets fixes uniquement tandis que le R^2 conditionnel est interprété comme la proportion de la variance expliquée par l'ensemble du modèle (c'est-à-dire les effets fixes et aléatoires). En conséquence, le R^2 marginal ne peut pas être supérieur au R^2 conditionnel.

Les conditions de normalité et d'homoscédasticité des modèles ont été vérifiées visuellement à l'aide de graphiques des résidus, ainsi que par des tests de Shapiro-Wilk [fonction `stats::shapiro.test()`] et de Levene [fonction `car::leveneTest()`], respectivement, effectués sur les résidus du modèle. Tous les tests statistiques ont été considérés comme significatifs pour des valeurs $p \leq 0,05$ (c'est-à-dire, $\alpha = 0,05$).

b) Arbres de régression « boostés » :

La relation entre les émissions cumulées de N_2O et les variables explicatives a été analysée aussi à l'aide de la méthode des arbres de régression « boostés » (*Boosted Regression Trees* ou BRT; Elith et al. 2006, 2008), s'appuyant sur des techniques d'apprentissage automatique (*Machine Learning*, annexe 1). Le modèle de BRT a été construit à l'aide de la bibliothèque *tidymodels* v1.2.0.

Avant de procéder à l'analyse, les données ont été séparées aléatoirement en jeu de données d'entraînement (75 % des données) et un jeu de données test (25 %). Les valeurs optimales des hyperparamètres du modèle (*nt*, *bf*, *lr*, et *tc*) ont été déterminées sur le jeu de données d'entraînement à l'aide d'une procédure de validation croisée à 10 blocs (10-fold cross-validation). Le modèle sélectionné était celui ayant la plus faible valeur de racine de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error* ou *RMSE*).

L'influence relative (IR) des variables prédictives a été mesurée à l'aide des formules développées par Friedman (2001). Cette mesure est basée sur le nombre de fois où une variable est sélectionnée pour la division, pondérée par l'amélioration de l'ajustement attribuable à cette variable. La valeur moyenne pour l'ensemble du modèle est ensuite calculée (Friedman et Meulman 2003, Elith et al. 2008). L'IR des variables est ensuite réajustée de manière à ce que leur somme soit égale à 100; une valeur plus élevée indiquant une plus forte influence de la variable sur la variable réponse (Elith et al. 2008).

L'effet marginal des variables explicatives sur la variable réponse a été visualisé à l'aide de graphiques de dépendance partielle (*partial dependence plots* ou PDP). Ces graphiques montrent comment chaque variable ou prédicteur affecte les prédictions du modèle.

La performance prédictive du modèle final a été évaluée sur le jeu de données test à l'aide du coefficient de détermination (R^2) et de la racine de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error* ou *RMSE*).

2.2.2. Évaluation du potentiel du modèle DNDCv.CAN à prédire les émissions de N_2O dans un système intégrant des CC au Québec

Le potentiel de prédiction du modèle DeNitrification-DeComposition dans sa version canadienne (DNDCv.CAN) a été testé en utilisant des données collectées de l'étude de D'Amours et al. (2023). La calibration du modèle a été effectuée en minimisant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur relative moyenne (NARE) entre les valeurs simulées et mesurées de la teneur en eau du sol et de la température du sol à 5 cm de profondeur, ainsi que des rendements des cultures et des émissions de N_2O des deux années de l'étude; soit 2019 et 2020 du traitement incluant l'utilisation de CC et l'application du fumier sous travail du sol avec un chisel (CP-PMGM) (D'Amours et al., 2023). Le modèle a été calibré par « essais et erreurs » jusqu'à ce que tous les paramètres soient raisonnablement optimisés. Pour une évolution d'humidité du sol comparable à celle mesurée, la capacité au champ en termes de pores saturés en eau (WFPS) a été ajustée à 45%. Il était supposé que la profondeur, l'espacement des drains de 10 cm du système de drainage souterrain du site étaient de 1 et 15 m, respectivement. Les plus faibles valeurs de RMSE et d'ARE d'émissions de N_2O mesurées et modélisées étaient obtenues avec des croissances d'enzymes et d'organismes de nitrification et de

dénitrification de 0,5 et de 1,0, respectivement. Bien que non fournie par l'étude, les rapports de carbone/azote (C/N) de 11 et d'azote ammoniacale/azote totale (N-NH₄/N_{Total}) de 38 du fumier ont été utilisés tels qu'indiqués dans le chapitre 10 du Guide de fertilisation du CRAAQ (CRAAQ, 2010). Ces valeurs calibrées ont ensuite été utilisées pour les simulations de validation.

La modélisation avec DNDCv.CAN n'a été effectuée que pour les traitements similaires (en termes de cultures, de travail de sol, d'application de fumier et de CC) à celui de CP-PMGM. Les traitements de labour avec fumier et CC (MP-PMGM), de chisel avec CC (CP-GM) et de chisel avec fumier et CC (CP-PMGM) avaient une rotation de culture similaire d'orge et de maïs-grain en 2019 et 2020, respectivement. Le traitement de labour avec fumier (MP-PM) avait cependant une rotation de maïs-grain et de soya en 2019 et 2020. L'étude n'incluait aucun traitement témoin (sans CC) pour une rotation d'orge et de maïs-grain. Les traitements avec chisel et fumier (CP-PM) et avec chisel et sans fumier et CC (CP-NM) ont été exclus de la modélisation, car des échecs de cultures ont été obtenus pour 2019 et 2020. Également, aucun rendement de culture n'a été mesuré pour le traitement de prairie (PF-PM) et ce traitement a également été exclu de l'exercice de modélisation. Il est important de mentionner que le site avait subi des travaux de drainage et une récente transition de production conventionnelle à biologique avant l'établissement des traitements cultureux.

Les indices statistiques utilisés pour évaluer la précision du modèle, tant pour calibration que pour la validation étaient la NARE, la RMSE et l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) :

$$NARE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{n \bar{M}} \times 100$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{(n)}}$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2 / n}}{\bar{M}} \times 100$$

Où : S_i est la valeur simulée, M_i est la valeur mesurée, n est le nombre de mesures, M est la moyenne des valeurs observées. Le coefficient de détermination (R^2) de la régression linéaire entre les valeurs modélisées et mesurées a été également utilisé comme indice de comparaison. Les indices NARE, NRMSE évaluent divers aspects de la performance du modèle. La valeur NARE (%) peut être utilisée pour illustrer une sous-estimation (NARE < 0) ou une surestimation (NARE > 0) des valeurs simulées par rapport à celles mesurées.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

1. Impact des cultures de couverture sur les émissions de N₂O au Québec :

Le recensement des études évaluant l'impact des CC sur les émissions de N₂O au Québec a permis d'identifier cinq études au total dans les régions de la Capitale-Nationale, le Centre du Québec, la Mauricie et Montréal (Tableau 1). Quatre études ont mesuré les émissions directes de N₂O au cours des six dernières années, tandis que la cinquième étude a évalué indirectement le potentiel de production de N₂O à partir des indices microbiologiques. Les flux de ces émissions ont été majoritairement mesurés pendant la saison de croissance de la culture commerciale, à différentes durées, avec une seule étude réalisée pendant la période de dégel au printemps (Hung et al., 2021).

L'impact des CC sur les émissions de N₂O au cours de la saison culturale était évalué pour différentes espèces de CC implantées en intercalaire dans le maïs ou le soya selon deux différents espacements (Gagné et al., 2023) ou pour une CC en dérobée selon une fertilisation organique et le type du travail du sol (D'Amours et al., 2023).

Toutes ces études étaient réalisées dans des systèmes de grandes cultures sur des sols de texture grossière majoritairement, avec un seul essai sur un sol de texture fine. Aucune étude n'a été trouvée pour d'autres systèmes agricoles intégrant des CC au Québec.

1.1. Impact des cultures de couverture sur les émissions de N₂O au cours de la saison culturale

1.1.1. *Impact selon la régie des cultures de couverture :*

Dans le cadre du projet de laboratoires vivants d'AAC, trois sites ont été implantés et répartis au sein de trois bassins versants en 2021 afin de développer des stratégies de réduction de l'usage de fertilisants avec les producteurs agricoles (AAC, 2023). Sur chaque site expérimental, une zone avec CC (légumineuses, ou graminées ou mélange multi-espèces) en dérobée et une autre sans CC ont été établies sur un champ relativement uniforme. Dans ces parcelles, une analyse microbiologique du sol a été réalisée lors de la culture du maïs, qui a suivi la CC. La caractérisation des gènes associés au processus de la dénitrification a indiqué que le potentiel d'émissions de N₂O dans les parcelles ayant des CC comme précédent cultural, est inférieur à celui des parcelles sans CC. De même, la biodiversité et l'identité des bactéries et des champignons différaient selon qu'il y avait ou non une CC. Il est à noter que la quantité d'azote totale accumulée dans la biomasse des CC, mesurée à la fin de l'automne 2021 (juste avant le premier gel mortel), était majoritairement plus élevée que dans le couvert de mauvaises herbes dans les zones sans CC. Les auteurs ont supposé qu'une fraction importante d'azote aurait été lessivée dans les parcelles avec CC-légumineuse étant donné la nature sableuse du sol de ce site.

Dans un système de rotation maïs-grain (2022)—soya (2023) établi sur le site de la ferme expérimentale de l'Université Laval à Saint-Augustin-de-Desmaures, sur deux champs avec des textures de sols contrastées (loam-sableux et loam-argileux), selon deux différents écartements entre les rangs du maïs-grain (30 po et 60 po) et avec différentes espèces de CC en intercalaire, des flux de N₂O ont été mesurés à chaque saison de croissance et le cumul de ces émissions a été calculé (Gagné et al., 2023). Les CC consistaient soit en un mélange de six espèces (ray-grass annuel, phacélie, trèfle rouge, moutarde d'Abyssinie, vesce velue et niébé), soit en un ray-grass annuel en semis pur. En 2022, les CC ont été semées dans les entre-rangs au stade 8 feuilles (7 juillet) du maïs selon différents taux de semis, sur 3 ou 4 rangs (en alternance) dans l'espacement 30 po, et sur 8 rangs dans l'espacement 60 po. En 2023, les CC ont été semées sur 3 rangs dans toutes les parcelles au stade R1 (6 juillet) du soya. Pour chaque espacement, un traitement témoin sans CC a été introduit dans le plan expérimental. Un travail du sol a été effectué en début de saison pour préparation de lit de semence à chaque année et après la récolte du maïs-grain ou du soya en mois d'octobre.

L'analyse préliminaire des données prises sur le champ de texture loam-sableux (données du champ loam-argileux non disponibles) montre un léger premier pic des flux de N_2O au début de la saison de croissance (en juin, avant le semis des CC) quel que soit l'espacement entre rangs et l'année d'essai, suivi par un pic élevé en fin du mois de juillet, spécifiquement dans les traitements avec des CC en 60 po, puis un autre pic léger en début d'automne (Figure 1a et b). Cependant, les émissions étaient plus élevées dans la culture du maïs-grain que dans le soya, probablement dues aux apports d'engrais azotés dans le maïs.

La tendance générale des émissions cumulées de N_2O au cours de la saison de croissance était croissante pour tous les traitements puis stable en automne dans la culture du maïs (Figure 1c). À un écartement de 60 po, l'intégration du raygrass ou du mélange de 6 CC a nettement augmenté les émissions cumulatives par comparaison au témoin. Par contre, à l'écart de 30 po, le mélange de 6 CC a réduit les émissions cumulatives par rapport au témoin, contrairement au raygrass. La biomasse aérienne des CC qui était significativement différente selon l'espacement et l'espèce de CC pourrait expliquer ces résultats. En moyenne de tous les traitements en 2022, la biomasse aérienne des CC dans l'écartement 60 po était 2,6 fois plus élevée que dans l'écartement 30 po, et la biomasse des 6 CC était 1,4 fois plus élevée que la biomasse du raygrass.

À l'année suivante en 2023, la différence entre les émissions cumulatives de tous les traitements était très faible pendant la saison de croissance, alors que le traitement intégrant 6 espèces de CC en 60 po se distinguait par des émissions élevées en automne suivi par le raygrass en 30 po (Figure 1d). Aucune différence significative entre les biomasses aériennes de ces traitements de CC n'a été observée à l'automne (6 octobre) de cette année de production du soya.

Des travaux réalisés dans un climat tempéré humide en Illinois aux États-Unis ont démontré l'efficacité de certaines espèces de CC (colza, vesce velue, seigle, raygrass), intégrées en dérobée en semis pur après la récolte du soya, dans la réduction des émissions de N_2O pendant la saison de croissance dans le maïs de l'année suivante (Behnke and Villamil, 2019). Cet impact était probablement induit par la réduction des ions nitrates (NO_3^-) dans le sol lors de la croissance des CC. Des conditions agro-climatiques favorables à l'établissement et la croissance des CC permettraient de réduire les flux de N_2O pendant la saison culturale suivant leur implantation. Une faible corrélation négative entre la biomasse de CC au printemps et les émissions de N_2O au cours de la saison culturale a été observée ($p < 0,0001$; $R^2 = 0,31$).

De leur côté, Wegner et al. (2018) ont observé une diminution significative des émissions de N_2O cumulées au cours de la saison de croissance de la culture principale, lorsqu'un seigle d'hiver mélangé ou non avec une vesce velue a été intégré à l'automne précédent le maïs ou le soya à Brookings, États-Unis. Une expérience similaire intégrant le seigle à l'automne a démontré son efficacité dans la réduction des émissions de N_2O (de 66% par rapport au témoin) à sa reprise de croissance au printemps, expliquée par une réduction des nitrates dans la couche 0-30 cm du sol par au moins 53% et par l'humidité favorable du sol (Reicks et al., 2021). Cet impact a été par contre amorti après l'émergence du maïs. D'autre part, Bressler and Blesh (2023) ont observé des pics de N_2O de 2 à 5 fois plus élevés dans les dix premiers jours suivant l'incorporation du trèfle ou un mélange de trèfle-seigle au printemps, semés en dérobée après le blé en régie biologique, qu'après l'incorporation du seigle semé seul en dérobée ou un traitement sans CC. Cet impact était probablement dû à la différence significative déterminée entre les rapports carbone/azote (C/N) du trèfle (21,8) et du mélange trèfle-seigle (25,6) versus le seigle (40,3). En effet, le rapport C/N élevé des résidus permet une libération plus lente d'azote minéral que la légumineuse. Aucune différence significative dans la biomasse aérienne de ces CC n'a été observée. Il est à noter que le rendement du maïs était plus élevé suite au seigle que sur le retour de vesce. Les auteurs ont supposé qu'un mélange légumineuse-graminée pourrait mieux réduire les émissions de N_2O qu'une légumineuse semée seule.

Tableau 1. Portrait des études réalisées au Québec sur l'impact des cultures de couverture (CC) sur les émissions de protoxyde d'azote (N₂O)

Référence	Période de l'essai	Région	Texture de sol	Cultures commerciales	Famille de CC	Système d'implantation de CC	Travail du sol	Type de fertilisation	Dose totale d'azote (kg/ha)	Période de mesure	N ₂ O cumulatif (g/ha)
Gagné et al. 2023	2022- 2023	Saint-Augustin-de-Desmaures	Loam sableux, loam-argileux	Maïs-grain (avec 2 espacements : 30 ou 60 po), soya	Graminée, mélange de 6 ou de 3 espèces de CC	Intercalaires	Réduit	Minérale	170	Été - automne (mai/ juin – fin octobre)	800 - 4500
AAC, 2023	2021- 2022	Lac Saint-Pierre	Textures variées	Maïs-grain	Légumineuse, graminée, mélange multi-espèces	En dérobée	-	Minérale	0 - 220	ND*	ND
D'Amours et al. 2023	2019-2020	Victoriaville	Loam sableux	Maïs, orge, soya, blé de printemps	Légumineuse	En dérobée	Labour conventionnel ou réduit	Organique	0 - 200	Printemps - automne (fin d'avril/ fin d'octobre/ début novembre)	470 - 3550
Hung et al. 2021	2018-2019	Ste-Anne-de-Bellevue	Loam sableux	Blé de printemps, orge	Graminée, légumineuse	En dérobée	Réduit	Organique	0 - 210	Printemps (mois d'avril)	0,17 - 12,64
Whalen et al. 2025**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*ND : non déterminé

**Étude en cours de réalisation, les informations ne sont pas disponibles au moment de la rédaction de ce rapport

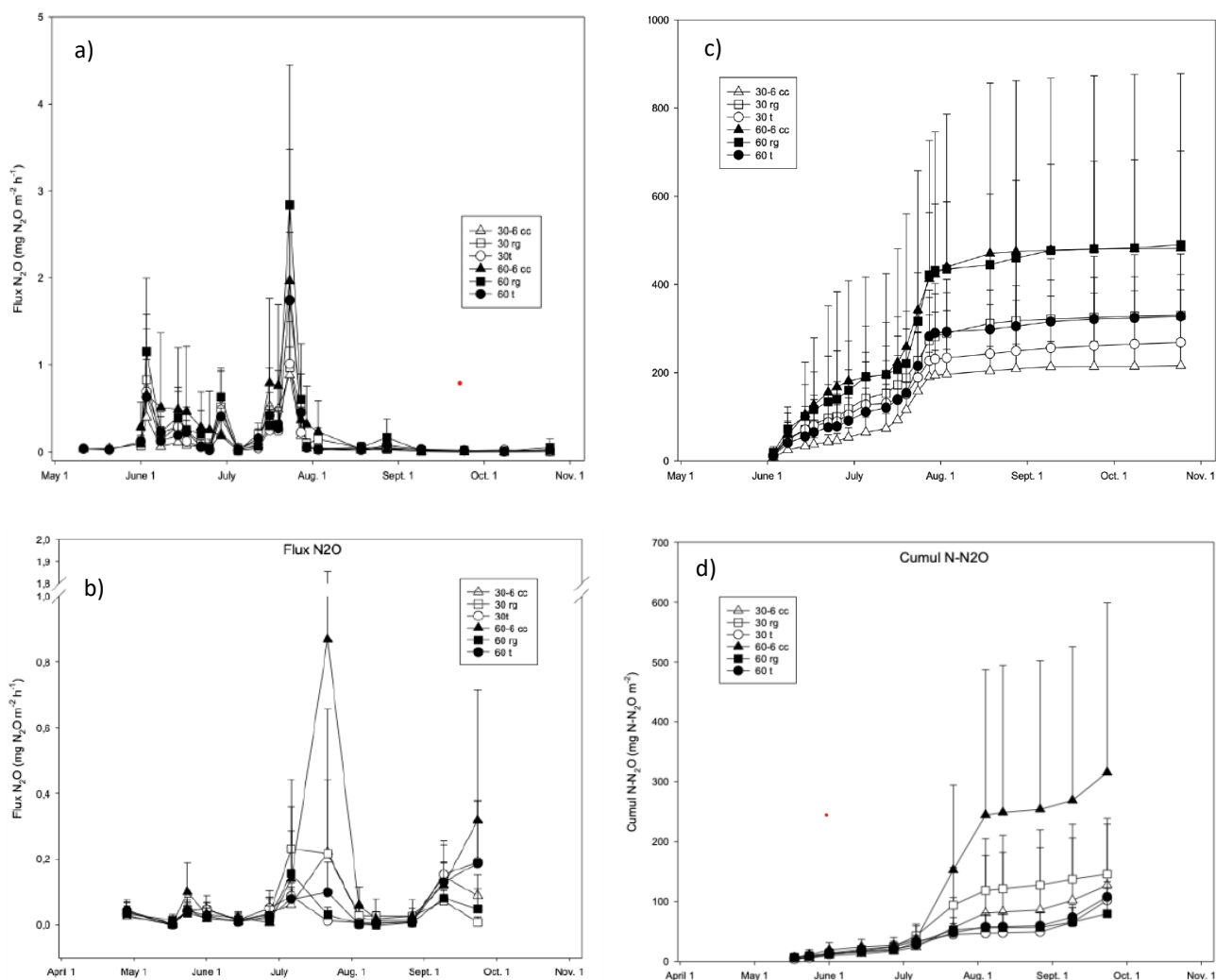


Figure 1. Flux (a) et émissions cumulées (c) de N₂O mesurées dans le maïs-grain entre mai et novembre sur un sol loam-sableux pour différentes espèces de cultures de couverture (CC) intercalaires et 2 espacements d'entre-rangs de maïs-grain, et flux (b) et émissions cumulées (d) de N₂O mesurées dans le soya entre mai et octobre sur un sol loam-sableux pour différentes espèces de cultures de couverture (CC) intercalaires et 2 précédents d'espacements d'entre-rangs de maïs-grain (30 : 30 pouces = 76 cm; 60 : 60 pouces = 152 cm). 30-6 cc : mélange 6CC avec espacement de 30 pouces; 30 rg : raygrass avec espacement de 30 pouces; 30t : aucune CC avec espacement de 30 pouces; 60-6 cc : mélange 6CC avec espacement de 60 pouces; 60 rg : raygrass avec espacement de 60 pouces; 60t : aucune CC avec espacement de 60 pouces (Gagné et al., 2023)

Par une méta-analyse couvrant 41 études réalisées dans plusieurs régions au monde, Nouri et al. (2022) ont démontré que les CC, avec tout système d'implantation confondu, ont la capacité de réduire le lessivage de nitrates de 69% en comparaison à des systèmes agricoles sans CC, avec une plus grande efficacité engendrée par des CC des familles de Brassicacées (75%) et de Poacées (52%). En outre, le potentiel le plus important de réduction des nitrates par les CC était observé dans les Ultisols (77%), les Histosols (78%) et les Inceptisols (77%), et était plus apparent avec l'augmentation du taux de sable dans le sol. D'une façon générale, les CC semblaient être plus performantes à réduire le lessivage de nitrates dans les systèmes maraîchers qu'en grandes cultures. Quant au type du travail

du sol, les CC sont capables de réduire la perte de nitrates jusqu'au 63% sous labour conventionnel versus 50% sous semis direct et 38% sous travail réduit du sol.

Une autre méta-analyse a révélé que les CC-non légumineuses ou le mélange de CC-non légumineuses-légumineuses ont un potentiel de réduction du lessivage de nitrates dans les cours d'eau significativement plus important (>50%) que les CC-légumineuses (Thapa et al., 2018). Ce potentiel est attribuable à la date de semis et à la biomasse des CC et des précipitations. Il est aussi plus important dans les sols de texture grossière et durant les années avec faibles précipitations. Un semis hâtif en automne et une biomasse importante permettent davantage une rétention de nitrates.

Par une méta-analyse des données collectées à partir des systèmes de grandes cultures dans différentes conditions climatiques au monde, Muhammad et al. (2019) ont conclu que les légumineuses augmentaient les émissions de N_2O contrairement aux autres familles de CC qui avaient un impact limité. Cet effet a été expliqué par la relation polynomiale, inversement proportionnelle, entre le rapport C/N de la biomasse des CC et les émissions de N_2O . En effet, le faible rapport C/N des légumineuses tels que la vesce et le trèfle, favorise une décomposition plus rapide que les résidus de CC-graminées tels le raygrass et l'avoine (Abdalla et al., 2014).

Il a été démontré aussi que l'incorporation des résidus de CC augmentaient les flux de N_2O par comparaison aux résidus laissés en surface ou exportés, ce qui concorde avec les résultats de la méta-analyse réalisée par Basche et al. (2014).

1.1.2. Impact selon la fertilisation azotée :

Au Québec, D'Amours et al. (2023) ont démontré que l'application du fumier de poule au printemps, dans une séquence d'orge-maïs grain intégrant du pois cultivé (*Pisum sativum* L.) en post-récolte de l'orge et du trèfle rouge en intercalaire avec le maïs, a augmenté les émissions de N_2O durant la saison de croissance du maïs de 40% par rapport à une rotation non fertilisée. La libération rapide de l'azote provenant du fumier suite à son application, alors que le système racinaire de la plante n'était pas encore bien développé, aurait pu être à l'origine de ces émissions. L'apport du carbone facilement décomposable par le fumier aurait aussi stimulé la dénitrification de l'azote en présence d'une humidité élevée du sol. D'ailleurs, des pics de N_2O ont eu lieu rapidement après l'application du fumier, parallèlement à des augmentations des concentrations d'ammoniac (NH_4^+) et des nitrates (NO_3^-) dans le sol, contrairement au système non fertilisé.

En comparant deux cycles de quatre ans d'une rotation simple (maïs-maïs-soya-soya) et une rotation diversifiée (maïs-maïs-soya-blé et trèfle rouge), sur un site de longue durée à Elora, Ontario, Linton et al. (2020) ont attribué les émissions élevées dans la rotation intégrant la légumineuse à la quantité d'azote minérale appliquée. En effet, la quantité totale d'azote appliquée durant les quatre années était plus élevée de 100 unités dans la rotation diversifiée que dans la rotation simple. Ce qui souligne l'importance de l'ajustement des engrais azotés selon les apports en azote des CC-légumineuses.

En calculant les émissions cumulatives de N_2O sur une période du mars à décembre chaque année dans une rotation de maïs-soya intégrant du seigle d'hiver, à chaque année sur une période de 10 ans, Parkin et al. (2016) ont observé des valeurs significativement plus élevées dans les années du maïs que du soya, avec ou sans seigle, qui ont été attribuées à la fertilisation azotée dans le maïs. En termes d'émissions cumulatives directes calculées sur 10 ans, aucun impact significatif du seigle n'a été observé.

En comparant des rotations du maïs-soya-blé d'automne en climat tempéré humide au Nord d'Amérique avec différents types du travail du sol, différentes espèces de CC en dérobée (légumineuses avant le maïs et non-légumineuses avant le soya) et du lisier appliqué avant le semis du maïs ou du blé, Saha

et al. (2021b) ont démontré que des apports d'azote provenant de la minéralisation des résidus de CC-légumineuses et du lisier ont augmenté les émissions de N_2O au cours de la saison de croissance du maïs par rapport aux phases du soya ou du blé d'automne. Par contre, l'exportation de la biomasse aérienne des CC-légumineuses avant le semis a permis de réduire les flux de N_2O de 60% durant la saison de croissance du maïs. En effet, l'incorporation des résidus de CC et du fumier aurait accéléré le processus de dénitrification par l'apport du carbone et d'azote. Ces résultats concordent bien avec ceux trouvés par Duan et al. (2018) au Danemark qui ont conclu que la minéralisation des résidus d'un mélange de CC (rye-vesce-velue-colza) au printemps émettait des flux comparables à ceux mesurés suite à une fertilisation azotée minérale, et plus élevés que dans le cas d'une fertilisation organique.

D'après Preza-Fontes et al. (2022), pour la même quantité totale d'azote apportée (224 kg/ha), la fertilisation azotée en saison de croissance du maïs (en pré-implantation et au stade V6-V7) semé après un seigle d'hiver, a significativement accru la production annuelle de N_2O d'environ 50% par rapport à une fertilisation en saison de croissance du maïs sans le seigle. Ces résultats confirment que des apports élevés en azote en période de décomposition des résidus de CC, sous des conditions d'humidité et de température du sol favorables à la dénitrification, engendrent des émissions élevées de N_2O .

1.2. Impact des cultures de couverture sur les émissions de N_2O hors de la saison culturale

Dans les régions tempérées humides, des flux de N_2O significatifs peuvent être émis à partir des sols agricoles hors de la saison de croissance, surtout pendant la période de gel-dégel au printemps. En effet, sur un site localisé à Québec, Tatti et al. (2014) ont observé une augmentation des taux d'émissions de N_2O jusqu'à 150 fois dans des parcelles fertilisées, pendant les dates de mesure les plus froides en hiver pour deux saisons quel que soit le type d'engrais appliqué au printemps précédent. L'abondance élevée des bactéries nitrificatrices (*Nitrobacter-like nxrA*, *archael amoA*) et dénitrificatrices (*nirK*, *nirS*) en mars et avril pourrait être à l'origine de ces émissions. De leur côté, van Bochove et al. (2000) ont observé des flux de N_2O deux à quatre fois plus élevés durant l'hiver et le printemps que durant la saison de croissance dans des sols agricoles au Québec. La teneur en eau du sol élevée durant l'été et l'automne aurait pu favoriser ces importantes émissions par l'accentuation de la dénitrification. Plus récemment, en comparant des flux de N_2O émis en dehors de la saison de croissance (du 1 novembre au 30 avril) par rapport aux flux annuels à partir de 21 études Canadiennes (représentant 286 traitements-années), Pelster et al. (2023) ont trouvé des proportions allant de -4% à 119% avec une moyenne de 35,5%. Les résultats ont démontré aussi que les émissions hors de la saison de croissance étaient plus élevées dans les parcelles fertilisées que dans les non-fertilisées. Les auteurs ont souligné l'importance de mesurer les flux de N_2O en dehors de la saison de croissance comme durant la saison.

Pour des pratiques agricoles incluant des CC, en utilisant le ratio entre les émissions de N_2O en dehors de la saison de croissance par rapport aux émissions pendant toute l'année, Ekwunife et al. (2021) ont observé que les CC avaient tendance à réduire ces émissions de 18% durant l'hiver dans un climat humide froid.

Au Québec, Hung et al. (2021) ont évalué l'impact de différents traitements de CC en combinaison avec deux types d'engrais organiques sur les émissions de N_2O pendant la période de gel-dégel au printemps de 2017 à 2019 sur un sol loam-sableux au site du Centre de recherche agricole de l'Université McGill (Sainte-Anne-de-Bellevue, Québec, Canada). Plus précisément, la rotation culturale sur ce site incluait du soya (2017), blé du printemps (2018) et orge (2019). Un dispositif expérimental a été implanté avec trois traitements d'amendement organique (fumier bovin, lisier bovin, aucun amendement) et trois traitements de CC (100% du raygrass, mélange de 50% raygrass et 50% vesce velue; et aucune CC). Ces traitements ont été appliqués en automne 2017 après la récolte du soya et en automne 2018 après

la récolte du blé du printemps. Les CC ont été détruites mécaniquement au printemps suivant, soit au 9 mai 2018 et 6 mai 2019. Les émissions directes de N_2O ont été mesurées du 31 mars au 27 avril 2018 et du 2 avril au 23 avril 2019 dans chaque traitement (avant la destruction des CC).

Les résultats trouvés ont montré qu'aucun impact significatif de CC n'a été observé sur les émissions de N_2O pendant la période de gel-dégel au printemps, ni sur les concentrations cumulatives de NH_4^+ et de NO_3^- , l'azote dissous, la dénitrification et l'humidité et le pH du sol. Le faible intervalle de croissance de ces espèces de CC entre l'automne et le début d'hiver dans ce climat tempéré froid, n'a pas probablement permis une absorption d'une teneur considérable d'N réactif par les plantes, qui auraient pu être perdues en N_2O pendant le printemps suivant. Cependant, des mesures de N_2O après la destruction de ces CC auraient pu détecter des flux considérables dans ces traitements. Selon Davis et al. (2019), les plus importants flux se produisent après le labour, la fertilisation azotée et la destruction des CC au printemps.

En période de dégel au printemps, Petersen et al. (2011) ont observé une augmentation des flux de N_2O dans des parcelles semées avec du radis fourrager à l'automne précédent (2 semaines avant la récolte du blé de printemps), probablement due à une libération du carbone et de l'azote labiles lors de la minéralisation des résidus du radis. Cet impact a été nettement plus marqué dans le cas du labour conventionnel que le travail réduit ou semis direct. L'incorporation des résidus à une profondeur de 20 cm aurait réduit le taux d'oxygène et favorisé la dénitrification. Ce constat a été confirmé par Taghizadeh-Toosi et al. (2022) qui ont observé des flux de N_2O cinq fois plus élevés au printemps dans des parcelles du radis fourrager par rapport aux parcelles témoins, alors que les émissions de N_2O étaient très faibles en automne. Ces émissions étaient 46% plus élevées dans les sols labourés que sous semis direct. La diminution de l'oxygène dans le sol pendant la décomposition des résidus de la CC incorporés dans le sol pourrait être un facteur contrôlant des émissions de N_2O (Duan et al., 2018). Ces résultats concordent bien avec ceux trouvés par Olofsson and Ernfors (2022) pour du radis oléagineux, la phacélie et l'avoine, avec des émissions deux fois plus élevées dans le cas du radis. Li et al. (2015) ont aussi observé des émissions de N_2O beaucoup plus élevées en fin d'hiver-début printemps pour plusieurs CC testées, spécifiquement le radis fourrager (Figure 2).

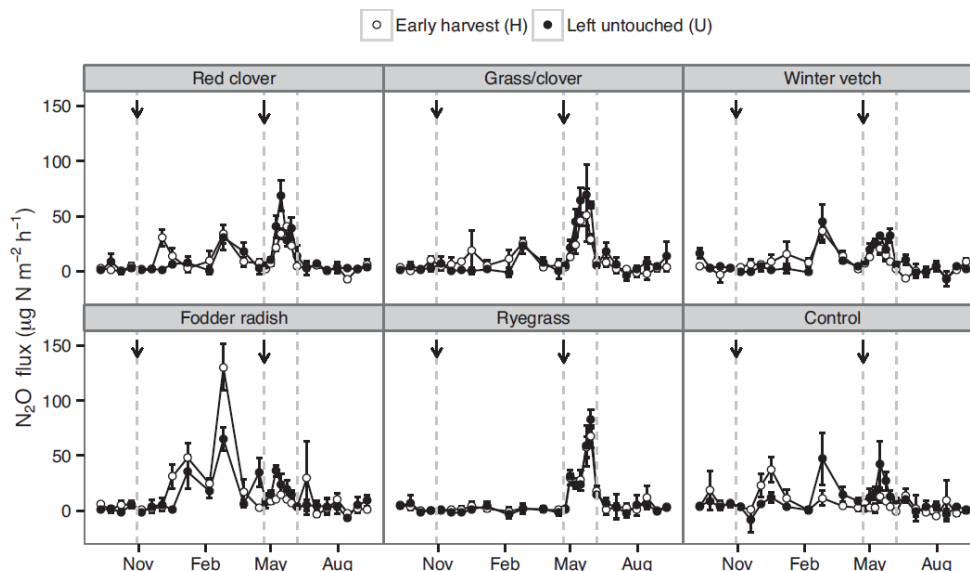


Figure 2. Flux de N_2O mesurés entre septembre 2012 et septembre 2013 pour différentes espèces de cultures de couverture (Li et al., 2015)

Il est bien documenté que le type du travail du sol affecte les émissions de N_2O . Machado et al. (2021) ont démontré que le labour conventionnel du sol augmente les émissions annuelles de N_2O de 20 à 100% par rapport au semis direct, dans des rotations de grandes cultures annuelles avec ou sans CC. Cependant, selon une revue de littérature réalisée par Abdalla et al. (2013), des résultats inverses ont été obtenus. En effet, les pratiques de conservation du sol comme le travail réduit et le semis direct augmentent les flux de N_2O plus que le labour conventionnel, suite à une augmentation des taux de nitrification, de la densité apparente et de la température et de l'humidité du sol. D'ailleurs, Pulido-Moncada et al. (2022) ont démontré que la compaction des couches superficielles des sols émet de 1,3 à 42 fois plus de N_2O dans les sols cultivés et les pâturages que les sols non compactés en surface. L'intégration de la moutarde comme CC dans l'orge de printemps en Irlande sous travail réduit du sol n'a pas permis d'atténuer les émissions de N_2O (Abdalla et al., 2014). De leur côté, Li et al. (2015) ont constaté que les flux de N_2O les plus élevés au cours de l'année étaient détectés après le labour au printemps quel que soit l'espèce de CC intégrée. En estimant les émissions annuelles cumulatives de N_2O par le modèle DeNitrification-DeComposition (DNDC), Fiorini et al. (2020) ont observé des valeurs de 40 à 50% plus élevées sous labour conventionnel que sous semis direct.

En comparant deux types du travail d'un sol de texture moyenne sous un climat tempéré, D'Haene et al. (2008) ont détecté des émissions de N_2O significativement plus élevées en automne sous travail réduit que sous labour conventionnel. Cet impact était positivement lié à la teneur du sol en nitrates. Dans une récente méta-analyse réalisée par Pelster et al. (2024) sur 15 études menées au Canada, il a été démontré que le travail minimum du sol avait émis généralement 12% de moins de N_2O que le labour conventionnel au cours de la saison de croissance. Cependant, dans des conditions où les précipitations au cours de la saison dépassaient 600mm, spécifiquement dans des sols avec un pourcentage de sable inférieur à 60%, le travail minimum avait une tendance à émettre plus de N_2O que le labour conventionnel. D'ailleurs, sur un sol de texture fine à l'Est du Canada, le travail réduit a augmenté les flux de N_2O par rapport à un labour conventionnel, à court et à long terme, dû à une teneur en eau élevée qui a accentué la dénitrification. Par contre, les émissions de N_2O étaient similaires entre les deux types du travail du sol sur un sol loam sableux (Pelster et al., 2021; Rochette et al., 2008). Dans un système incluant le radis fourrager comme CC d'hiver, Petersen et al. (2011) ont observé plus d'accumulation de N_2O dans le profil du sol labouré par rapport à un sol sous travail réduit ou semis direct.

En Ontario, une récente étude (Gao et al., 2023) a démontré qu'un mélange du trèfle incarnat et raygrass anglais, utilisé en intercalaire avec du maïs-grain et enfoui à l'automne, a augmenté d'environ 2,5 fois les émissions cumulatives de N_2O du novembre en avril par rapport à un traitement témoin (maïs-grain sans CC et sans travail du sol à l'automne) (Figure 3). Il a été aussi observé que même sans travail du sol à l'automne, l'intégration de ces CC a augmenté considérablement la production du N_2O . Toutefois, le travail réduit du sol à l'automne a augmenté les émissions totales de N_2O de 33,1% en présence de ces CC par rapport à un sol non travaillé. La minéralisation de la biomasse du trèfle pendant la période du dégel aurait stimulé la production de N_2O , une hypothèse qui pourrait être justifiée par les fortes concentrations de nitrates dans les 15 premiers centimètres du sol pendant cette période. La contribution du raygrass dans ces émissions était non considérable d'après les auteurs.

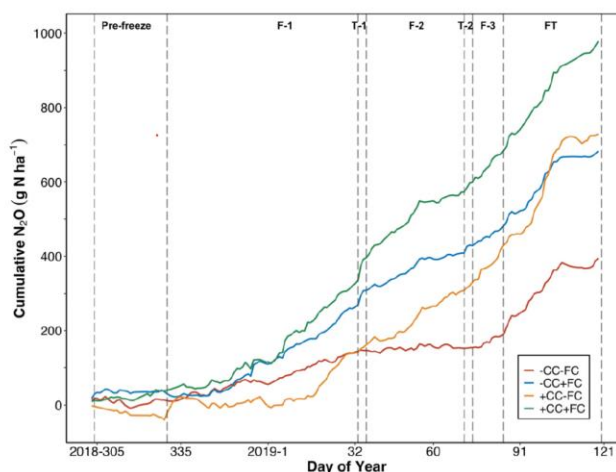


Figure 3. Émissions cumulatives de N_2O mesurées à partir des traitements incluant (+CC) ou non des cultures de couverture (-CC) et enfouies (+FC) ou non (-FC) (Gao et al., 2023)

Dans une étude réalisée sur un site à Lethbridge, Alberta, Thomas et al. (2017) ont observé une augmentation des flux moyens de N_2O pendant l'hiver de 39 et 323% dans des parcelles du radis (*Raphanus sativus* L.) par rapport au seigle (*Secale cereale* L.) et au traitement témoin, respectivement. La forte corrélation de ces flux avec les concentrations élevées de nitrates qui ont été quantifiées juste avant le début de l'hiver (mi-décembre) pourraient justifier cet impact. Les auteurs ont conclu que ces CC non-légumineuses ont été à l'origine des émissions de N_2O hors saison de croissance à travers la stimulation de la dénitrification par leurs systèmes racinaires.

Une expérience d'incubation des échantillons du sol a été menée pour évaluer l'effet des cycles de gel-dégel sur les émissions de N_2O (Ejack and Whalen, 2021). Des pots ensemencés ou non avec du raygrass annuel ont reçu quatre traitements d'engrais azoté (aucun engrais, lisier bovin, fumier bovin, urée) et ont été soumis à trois cycles successifs de 7 jours de gel ($-4^{\circ}C$) et de 9 heures de dégel ($4^{\circ}C$). En général, les émissions de N_2O étaient plus élevées d'environ 10 fois dans les pots dégélés, quel que soit la fréquence du gel-dégel, par rapport aux pots non gelés, indiquant que l'azote n'est pas stable dans les sols gelés. Le type d'engrais azoté et la CC n'ont pas affecté la production de N_2O cumulative quel que soit le cycle, malgré leur impact significatif sur l'azote minéral du sol. Une faible partie de ces émissions (14%) était expliquée par la teneur du sol en N minéral, suggérant que la production de N_2O durant le gel-dégel était contrôlée plus par d'autres facteurs physico-chimiques et biologiques.

Dans un contexte de réchauffement climatique sous un climat froid où le sol sera moins couvert en neige, le potentiel de prélèvement de nitrates par les CC pourrait être réduit résultant en une concentration plus importante dans une profondeur de 90 cm, tel que démontré par Lapierre et al. (2022) dans une étude réalisée sur un sol loam-sableux en Ontario, Canada.

1.3. Impact des cultures de couverture sur le bilan annuel des émissions de N_2O

En comparaison avec un sol sans couvert végétal en automne, l'intégration du seigle après la récolte du maïs a permis d'atténuer les émissions cumulatives annuelles de N_2O mesurées à partir de la reprise du seigle au printemps jusqu'au printemps de l'année suivante. Le rapport C/N élevé des résidus du seigle aurait permis l'immobilisation microbienne de l'azote minéral résiduel (NO_3^-) et par la suite sa disponibilité pour les microorganismes dénitrificateurs (Davis et al., 2019). Par contre, l'intégration d'un mélange seigle-vesce velue en dérobée a stimulé la production annuelle de N_2O , qui a été beaucoup plus marquée dans un traitement de vesce velue intégrée en dérobée en semis pur.

Ces résultats pourraient être expliqués par une minéralisation rapide de la vesce velue à cause de son faible rapport C/N, alors que la présence du seigle dans le mélange aurait réduit la vitesse de la minéralisation des résidus. Il a été aussi démontré, dans une expérience en serre de 85 jours, que la vesce velue a significativement augmenté les émissions cumulatives de N_2O lorsqu'incorporée dans le sol juste avant le semis du maïs par rapport au seigle, dû à une plus grande perte de nitrates qui auraient été convertis en protoxyde d'azote. De même, le prélèvement d'azote et le rendement du maïs étaient significativement plus élevés d'une fois et demie dans le traitement du seigle que dans celui avec la vesce (Ladan and Jacinthe, 2017).

De leur côté, Jarecki et al. (2009) ont conclu que les émissions annuelles de N_2O (octobre 2005-octobre 2006) étaient contrôlées par la dose de fertilisation azotée, quel que soit la forme d'engrais ou le temps d'application, plutôt que par un mélange de graminées (seigle et avoine) semé en intercalaire dans le soya (3 semaines avant sa récolte) et détruit chimiquement au printemps. Ces conclusions ont aussi été confirmées par O'Brien et al. (2022) suite à l'étude de l'impact des graminées (avoine ou seigle) intégrées en dérobée à chaque année et de la fertilisation azotée dans une rotation maïs-soya à Ames, Iwo, États-Unis.

1.4. Synthèse générale et besoins futurs en recherche au Québec :

En conclusion, les émissions de protoxyde d'azote à partir des systèmes agricoles intégrant des CC sont très variables au cours de l'année dépendamment de plusieurs facteurs (Figure 4). En climat tempéré humide, d'importants pics de flux de N_2O se produisent généralement au début de la saison culturale, suite à une fertilisation azotée, au début de l'automne en cas de CC en intercalaire et à la période de dégel au printemps en cas de CC en dérobée.

En général, les CC-légumineuses émettent plus de N_2O que les graminées ou autres familles à cause de leur faible pouvoir d'absorption de nitrates dans le sol, qui se transforment directement en N_2O dans des conditions favorables d'humidité du sol, ou indirectement suite au lessivage. Les légumineuses ont aussi un faible pouvoir de rétention de l'azote provenant des engrais par rapport aux graminées (Langelier et al 2021). À la fin de leur cycle de croissance, le faible rapport C/N de la biomasse des légumineuses facilite la décomposition microbienne des résidus ce qui stimule la production de N_2O . Par contre, les graminées ou un mélange de graminées-légumineuses sont généralement capables de prélever les nitrates libres dans le sol au début de leur cycle de croissance, ce qui réduit par conséquence les émissions directes et indirectes de N_2O . Leur potentiel dépend toutefois de l'établissement et du développement de leur biomasse et de leur système racinaire ainsi que de la texture du sol et de la quantité des précipitations reçues. Par exemple, des CC en dérobée, semées suffisamment tôt avant le premier gel, peuvent être efficaces dans la réduction de nitrates et la production de N_2O pendant la saison de croissance suivante. Par contre, la minéralisation des résidus de ces CC pendant la période de dégel au printemps, surtout dans le cas où ils sont incorporés dans le sol, peut dégager des flux considérables de N_2O . Dans le cas de légumineuses, la minéralisation se produit rapidement à cause du faible rapport C/N et libère ainsi de l'azote, qui est susceptible de se transformer en des flux importants de N_2O en conditions d'humidité favorables. Malgré que le labour puisse accentuer le dégagement de N_2O à travers la minéralisation des résidus de CC, des problèmes de compaction du sol, spécifiquement dans les sols de texture fine, peuvent aussi favoriser l'émission de N_2O suite à l'accumulation des nitrates. Le principal facteur qui affecte significativement les émissions de N_2O dans les systèmes intégrant les CC, spécifiquement les légumineuses, est la fertilisation azotée. Plusieurs études confirment cet aspect et suggèrent d'optimiser les doses et le mode d'application des engrais azotés afin de réduire le risque d'émissions de N_2O .

À la lumière de cette revue de littérature sur l'impact des CC sur les émissions de N_2O au Québec et en climat tempéré en général, il ressort un grand manque de connaissances sur cette thématique au Québec. Plusieurs aspects méritent d'être investigués ou développés dans les conditions agro-pédo-climatiques du Québec, spécifiquement :

- L'impact de différentes espèces de CC et de leur mode d'intégration (en intercalaire, en dérobée, en pur, en mélange) dans différents systèmes agricoles (grandes cultures, maraîcher) et régies de production (conventionnelle, biologique, sol travaillé ou semis direct) dans différents contextes pédologiques et météorologiques sur les émissions de N_2O ;
- L'impact de l'interaction entre les CC-légumineuses et la fertilisation azotée sur les émissions de N_2O afin d'optimiser la gestion de la régée des CC (choix d'espèces, moment d'intégration) avec les apports en engrais azotés (sources, moment et doses) dans le but de réduire les pertes gazeuses sans nuire aux rendements des cultures principales;
- Le développement des modèles de prédiction des émissions de N_2O spécifiques aux systèmes agricoles intégrant des CC et applicables à la ferme;
- Le suivi des émissions de N_2O tout au long de l'année afin de quantifier les émissions en dehors de la saison de croissance qui sont parfois très importantes surtout pendant la période de dégel sous un climat tempéré froid.

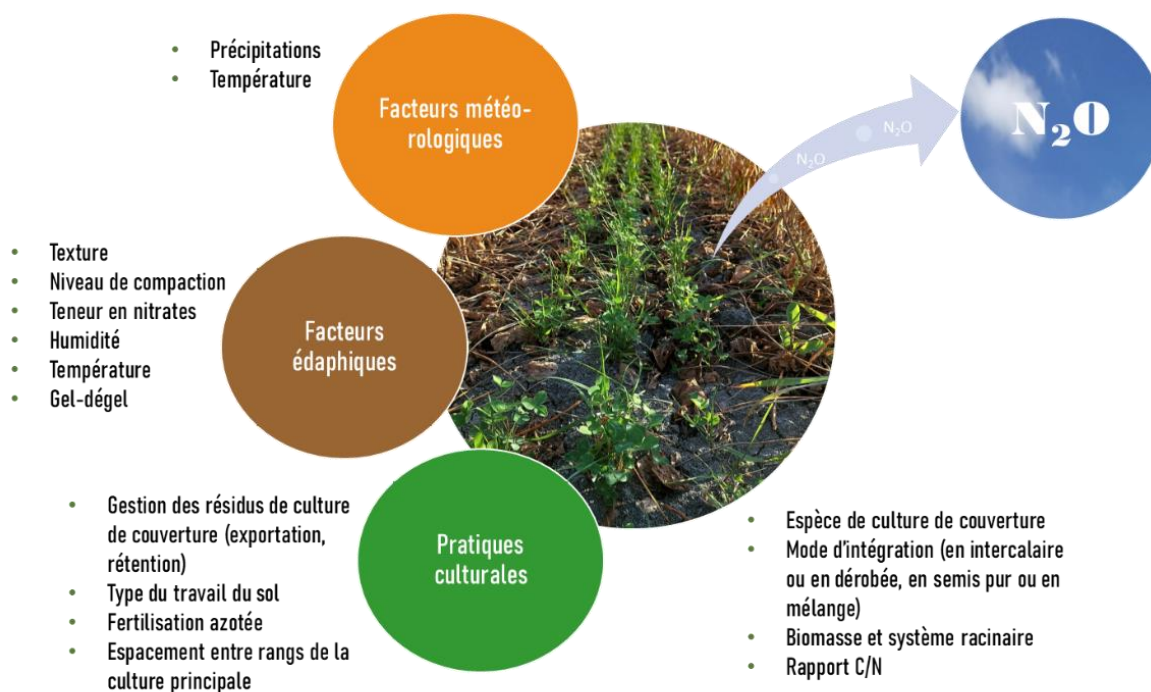


Figure 4. Facteurs influençant l'impact des cultures de couverture sur les émissions de protoxyde d'azote (N_2O) (Schéma synthétisé à partir de la littérature par Abdi. D.)

2. Prédiction des émissions de N₂O dans des systèmes intégrant des CC

2.1. Modèles de prédiction de N₂O dans des systèmes intégrant des CC :

L'estimation des flux de N₂O sous l'effet des pratiques culturales est une composante essentielle dans la stratégie de réduction de GES de provenance agricole. La mesure au champ des émissions directes de N₂O par la méthode des chambres est délicate en raison d'une variabilité spatiale et temporelle élevée (Metay, 2008). En effet, avec la taille réduite de ces chambres et leur utilisation sur une courte période du temps, les extrapolations des émissions de N₂O à l'échelle de l'année doivent être considérées avec précaution. En outre, l'utilisation de ces mesures directes pour une estimation/inventaire à l'échelle régionale ou nationale n'est pas pratique vu que ça nécessite des mesures à très large échelle et sur une longue période du temps (Giltrap et al., 2010).

Les flux de N₂O peuvent être aussi estimés par modélisation en se basant sur des approches empiriques ou de processus (Fouli, 2021). Les modèles empiriques représentent un ensemble de relations mathématiques qui relient une entrée à une sortie déterminée en utilisant une approche factorielle. Par contre, les modèles de processus simulent des interactions dans un écosystème donné à travers des algorithmes représentatifs. Des exemples de modèles de prédiction des émissions de GES sont représentés dans le tableau 2.

Pour un inventaire national d'émissions de N₂O à partir des sols agricoles, plusieurs pays utilisent la méthode empirique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Cette méthode se base sur un facteur d'émissions fixe représentant la proportion de l'azote appliqué au sol qui est perdue sous forme de N₂O dans l'atmosphère. Cependant, en raison du nombre limité des données à partir desquelles ce facteur a été calculé et de multiples pratiques culturales qui peuvent l'affecter (type du sol, temps et fréquence de fertilisation, profondeur d'application, utilisation d'inhibiteurs de nitrification), un degré d'incertitude élevé est associé à ce facteur (Giltrap et al., 2010).

Pour ces raisons, des modèles se basant sur des processus biochimiques contrôlant les émissions de N₂O sont de plus en plus développés. À titre d'exemple, le modèle *Denitrification-Decomposition* (DNDC), simulant des interactions biogéochimiques dans le cycle d'azote menant à des émissions de N₂O, a été développé et utilisé la première fois aux États-Unis Américains pour des sols agricoles (Li, 1992). Son utilisation a été par la suite répandue dans de nombreux pays pour prédire aussi les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et de méthane (CH₄) et plusieurs autres paramètres pédo-agronomiques dans différents systèmes de production. Il est ainsi possible de l'utiliser pour un inventaire régional ou national visant l'évaluation de l'évolution des émissions de GES, ainsi que pour le développement et la vérification des stratégies d'atténuation des changements climatiques.

Au Canada, une nouvelle version de ce modèle a été récemment développé afin d'améliorer la précision des prédictions dans les conditions spécifiques du climat froid (Kröbel et al., 2011; Smith et al., 2020).

Quoique ce modèle ait été largement utilisé dans différents systèmes agricoles, son évaluation pour des systèmes intégrant des CC est encore très limitée. Au Québec, Hung et Whalen (2021) ont démontré l'efficacité de l'utilisation de la version canadienne du modèle DNDC dans l'estimation de la biomasse des CC et de la température du sol. Cependant, ce modèle a surestimé les flux de N₂O émis lors de la période de dégel au printemps. Sous un climat humide au sud-est des États-Unis Américains, Singh et al. (2022) ont prouvé que ce modèle a la capacité de prédire les émissions cumulatives de N₂O de la saison de croissance dans des rotations de grandes cultures incluant des CC, mais pas les flux quotidiens de N₂O. Par contre, l'utilisation de machine à vecteurs de support (support-vector machine, SVM), technique d'apprentissage automatique (machine learning) sur ce même site expérimental, a permis d'estimer d'une façon fiable les flux de N₂O dans les systèmes de CC (Mehmandoust Kotlar et al., 2022).

Tableau 2. Modèles de processus ou empiriques utilisés pour prédire les émissions de N₂O dans des systèmes agricoles intégrant ou non des cultures de couverture (CC)

Modèle de prédiction de N ₂ O	Pays	Système intégrant des CC	Référence
UK-DNDC	Canada	Non	Yadav et Wang, 2021
DNDC, DAYCENT	Canada	Non	Smith et al., 2008
DNDC	Canada	Non	Smith et al., 2002
DNDC	Irlande	Non	Abdalla et al., 2009
DNDC	Canada	Non	Hutchinson et al., 2007
Modèle empirique	Canada	Non	Liang et al., 2020
Régression	Canada	Non	Rochette et al., 2018
Machine Learning	États-Unis	Non	Saha et al., 2021a
DNDCv.CAN	Canada	Oui	Hung et Whalen, 2021
DNDCv.CAN	États-Unis	Oui	Singh et Kumar, 2022
Machine Learning	États-Unis	Oui	Mehmandoost et al., 2022

2.2. Développement du modèle empirique de prédiction des émissions de N₂O dans des systèmes intégrant des CC :

2.2.1. *Modèle linéaire mixte :*

Le développement d'un modèle de prédiction des émissions cumulatives de N₂O à partir d'un nombre réduit de variables explicatives a abouti à un modèle avec des valeurs VIF faibles (< 5), permettant une interprétation fiable des résultats, et avec des coefficients de détermination conditionnel et marginal de 0,88 et 0,71, respectivement. L'équation de régression du modèle se présente comme suit :

$$\ln(N_2O_{cum}) = 7.389 + 0.311 * SOILTEXT_LL - 1.476 * SOILTEXT_LS - 0.304 * TILL_RED - 0.303 * TILL_SD - 0.071 * CC_AUT + 0.112 * CC_GRA + 0.081 * CC_LEG - 0.213 * CC_MEL + 0.004 * NITRO - 3.896 * PERIOD_HSAI - 0.205 * PERIOD_SAI$$

Avec : SOILTEXT_LL : texture du sol loam-loameux; LS : loam-sableux; TILL_RED : travail du sol réduit; SD : semis direct; CC_AUT : cultures de couverture semées en automne; GRA : graminée; LEG : légumineuse; MEL : mélange; NITRO : apport en azote (kg/ha); PERIOD_HSAI : période de mesure hors saison; SAI : période de mesure en saison.

Parmi les cinq variables incluses dans le modèle, deux variables seulement avaient une contribution significative; soient l'apport en azote (18,2%; $p < 0,001$) et la période de mesure (11,7%; $p = 0,003$). Aucune des autres variables (texture de sol, type de travail de sol et type de culture de couverture) n'était significative.

La comparaison des émissions de N₂O prédites par ce modèle sous forme logarithmique à celles mesurées et transformées logarithmiquement montre bien une forte corrélation significative (Figure 5a).

Cependant, ces émissions ne sont plus corrélées lorsqu'elles sont retransformées d'une façon exponentielle vers les valeurs originales (Figure 5b), ce qui limite malheureusement l'utilisation de ce modèle à cette étape. Des essais avec d'autres types de transformation des données pourraient résoudre ce problème et améliorer la performance de ce modèle.

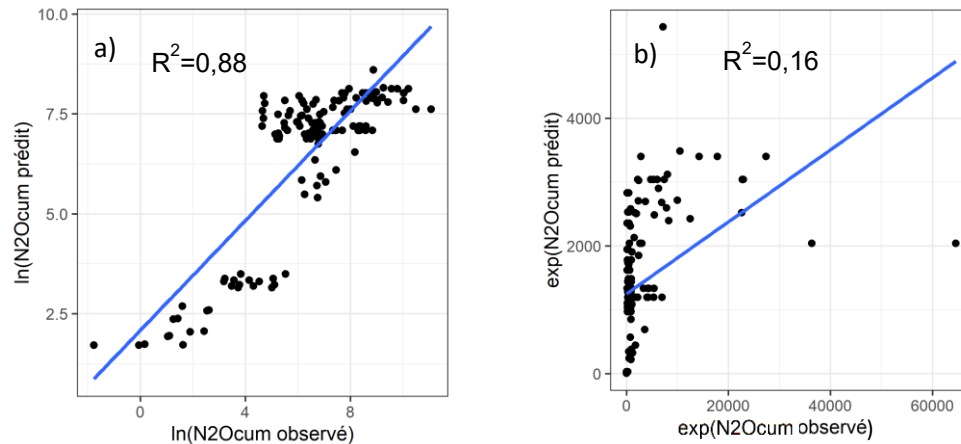


Figure 5. Relation entre la valeur prédite par le modèle réduit et la valeur réelle observée. La figure de gauche (a) montre les valeurs en logarithme et la figure de droite (b) montre les valeurs retransformées dans le format original

2.2.2. Modélisation par Arbres de régression « boostés » :

La performance prédictive du modèle obtenu par la méthode de BRT était très bonne. La relation entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles observées avait un coefficient de détermination R^2 de 0,87 lors de la validation croisée et un R^2 de 0,93 lors des prédictions (

Figure 6).

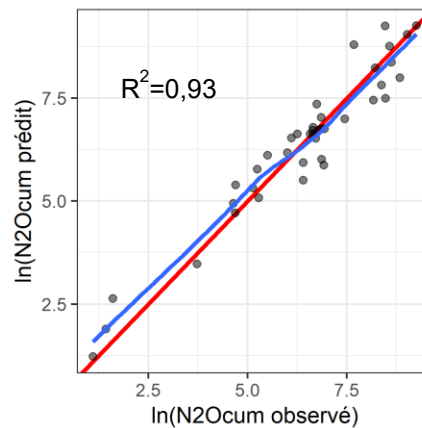


Figure 6. Relation entre les valeurs prédites par le modèle BRT et les valeurs réelles observées pour le jeu de données test (en logarithmes)

La variation du modèle était expliquée en majorité par la culture principale (31,3 %), la période de mesure (17,7 %), le nombre de mois de mesures (12,7 %), la texture du sol (9,0 %) et l'apport en azote (8,7%) pour un total de 79%. Les variables en lien avec les cultures de couverture (espèce de culture de couverture, période de semis, période de destruction et incorporation) comptaient ensemble pour environ 11% de la variation expliquée par le modèle. Le type du travail du sol et la période et le type de fertilisation expliquait environ 10% de la variation de ce modèle. De même que pour le modèle linéaire, la retransformation exponentielle des valeurs prédites par le modèle BRT en unité logarithmique vers des valeurs en unité de mesure de N₂O résulte en une perte de précision de prédiction (Figure 7).

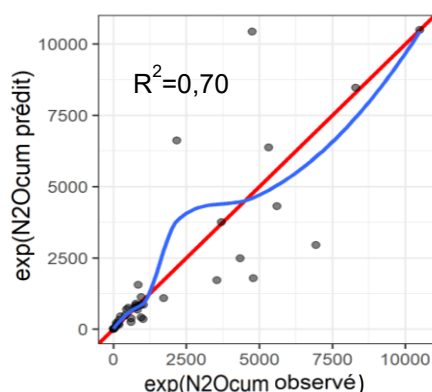


Figure 7. Relation entre les valeurs prédites par le modèle BRT et les valeurs réelles observées après retransformation exponentielle

2.3. Efficacité du modèle DNDCv.CAN à estimer le N₂O dans un système intégrant des CC au Québec :

La comparaison des flux de N₂O résultant de la modélisation avec DNDCv.CAN à celles mesurées au champ dans l'étude de D'Amours et al. (2023), a révélé une sous-estimation par le modèle au début de la saison (de mai à juillet) dans presque tous les traitements pour les deux ans (Figure 8). Par contre en 2020, une surestimation des flux en saison par le modèle DNDC a été observée dans tous les traitements (Figure 8). Hung et Whalen (2021) ont aussi observé que le modèle DNDCv.Can tendait à surestimer les émissions de N₂O par rapport aux mesures au champ, avec des valeurs de RMSE variant de 6,14 à 68,2 g N₂O ha⁻¹ j⁻¹ relativement similaires à celles obtenues dans notre étude. Ce grand écart entre les valeurs mesurées et estimées par le modèle DNDC durant la saison de croissance s'est traduit par de très faibles corrélations pour tous les traitements incluant ou non des CC (Figure 9, tableau 3).

Tableau 3. Comparaison des émissions journalières de N₂O modélisées avec DNDCv.CAN (ligne) pour les traitements des systèmes de cultures avec : travail du sol conventionnel (MP) ou réduit (CP), application du fumier (PM) et de cultures de couverture (GM) de l'étude de D'Amours et al. (2023)

Traitement de culture	Année	Nombre de données	Émission moy. de N ₂ O		RMSE (g N ₂ O ha ⁻¹ d ⁻¹)	NRMSE (%)	NARE (%)	r ²
			Mesurée	Modélisée				
			(g N ₂ O ha ⁻¹ d ⁻¹)	(g N ₂ O ha ⁻¹ d ⁻¹)				
MP-PM	2019	29	39,10	9,84	63,5	162	54	0,012
	2020	33	4,19	6,30	6,3	151	-48	0,049
MP-PMGM	2019	28	26,56	8,59	39,6	149	56	0,018
	2020	32	6,10	6,99	13,6	223	-17	0,023
CP-GM	2019	28	4,51	7,98	6,4	142	-63	0,049
	2020	32	2,85	2,83	5,0	175	-2	0,000
CP-PMGM	2019	28	17,96	9,77	26,0	145	37	0,001
	2020	32	5,49	7,60	13,6	247	-41	0,048

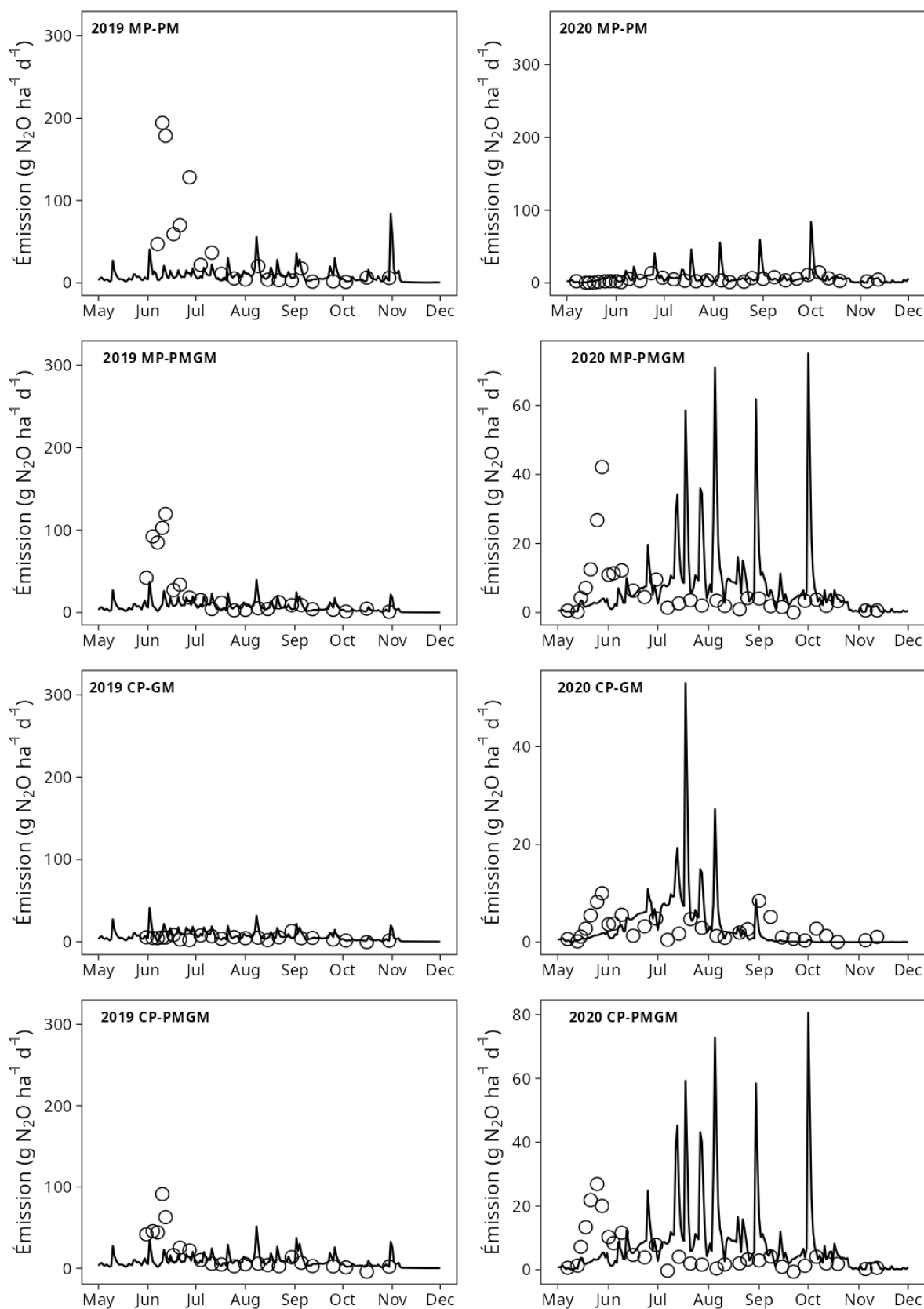


Figure 8. Évolution des émissions de N_2O mesurées (cercles ouverts) et simulées avec le modèle DNDCv.CAN (ligne) pour les traitements des systèmes de cultures avec : travail du sol conventionnel (MP) ou réduit (CP), application du fumier (PM) et de cultures de couverture (GM) de l'étude de D'Amours et al. (2023)

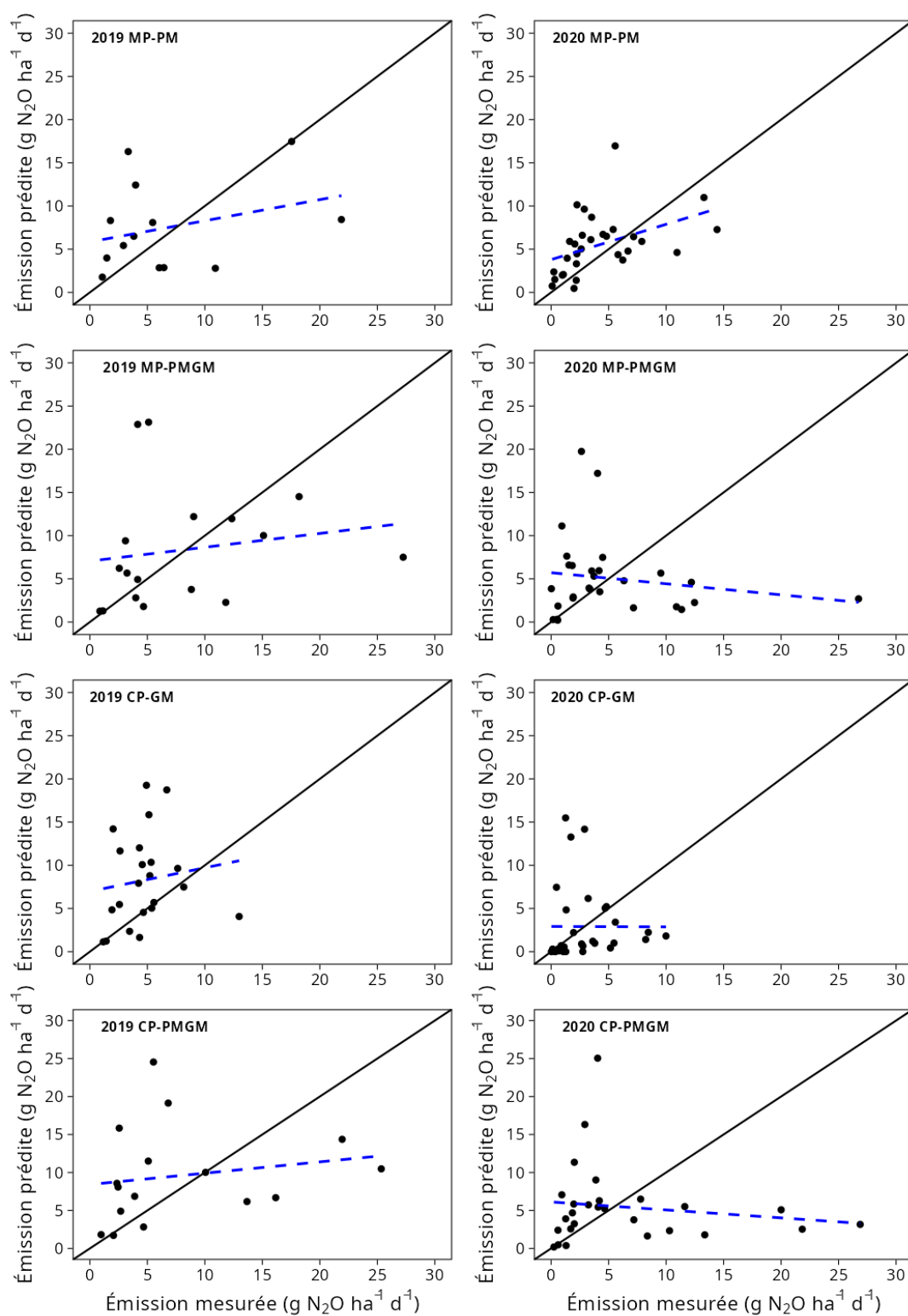


Figure 9. Comparaison des émissions de N_2O mesurées et prédites par le modèle DNDCv.CAN pour les traitements des systèmes de cultures avec : travail du sol conventionnel (MP) ou réduit (CP), application du fumier (PM) et de cultures de couverture (GM) de l'étude de D'Amours et al. (2023). Les émissions de plus de $30 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$ ne sont pas présentées pour faciliter la comparaison entre traitements et la visualisation des nuages de points de données. La ligne bleue pointée représente la régression linéaire

Quoique les estimations des flux de N₂O avec le modèle DNDCv.CAN ne soient pas précises, l'évolution des émissions cumulatives estimées par ce modèle suivait la même tendance des cumuls mesurés avec un faible écart dans les traitements incluant des CC sous travail réduit (CP-GM) du sol en 2019 et 2020. Malgré le grand écart au début de la saison de 2019 dans le traitement CP-PMGM, les émissions cumulatives finales mesurées et estimées avaient tendance à se rejoindre à la fin de saison (Figure 10).

Par contre, le modèle DNDC a sous- (en 2019) ou sur-estimé (en 2020) les émissions cumulatives dans les systèmes incluant des CC avec fertilisation organique et labour conventionnel. D'Amours et al. (2023) mentionnaient que des émissions cumulatives plus faibles avait été obtenues à partir des parcelles avec chisel (CP) comparativement à celles avec labour (MP) et que les traitements avec fumier émettaient davantage de N₂O que ceux sans fumier.

Les indices de performance de modélisation de RMSE et de NARE étaient plus élevés pour le cumulatif saisonnier des émissions de N₂O que les flux journaliers (Tableau 4). Or, l'indice normalisé du RMSE était moins élevé et donc, présentait une meilleure performance du modèle DNDC sur une base d'émissions cumulatives que journalières. Les coefficients de corrélation étaient également bien meilleurs pour les émissions simulées par rapport à celles mesurées sur une base cumulative.

Tableau 4. Comparaison des émissions cumulatives de N₂O estimées avec DNDCv.CAN pour différents traitements des systèmes de cultures avec : travail du sol conventionnel (MP) ou réduit (CP), application du fumier (PM) et de cultures de couverture (GM) de l'étude de D'Amours et al. (2023)

Traitement de culture	Année	Nombre de données	Émission de N ₂ O		RMSE (g N ₂ O ha ⁻¹)	NRMSE (%)	NARE (%)	r ²
			Mesurée (g N ₂ O ha ⁻¹)	Modélisée (g N ₂ O ha ⁻¹)				
MP-PM	2019	29	3428	1378	1935,5	77	53	0,715
	2020	33	839	1232	321,1	86	-52	0,922
MP-PMGM	2019	28	2270	1186	1079,1	66	52	0,775
	2020	32	870	1574	450,3	83	-30	0,746
CP-GM	2019	28	626	1100	305,2	100	-68	0,985
	2020	32	475	626	155,1	62	-34	0,904
CP-PMGM	2019	28	1530	1444	496,1	45	32	0,767
	2020	32	756	1697	574,6	118	-56	0,728

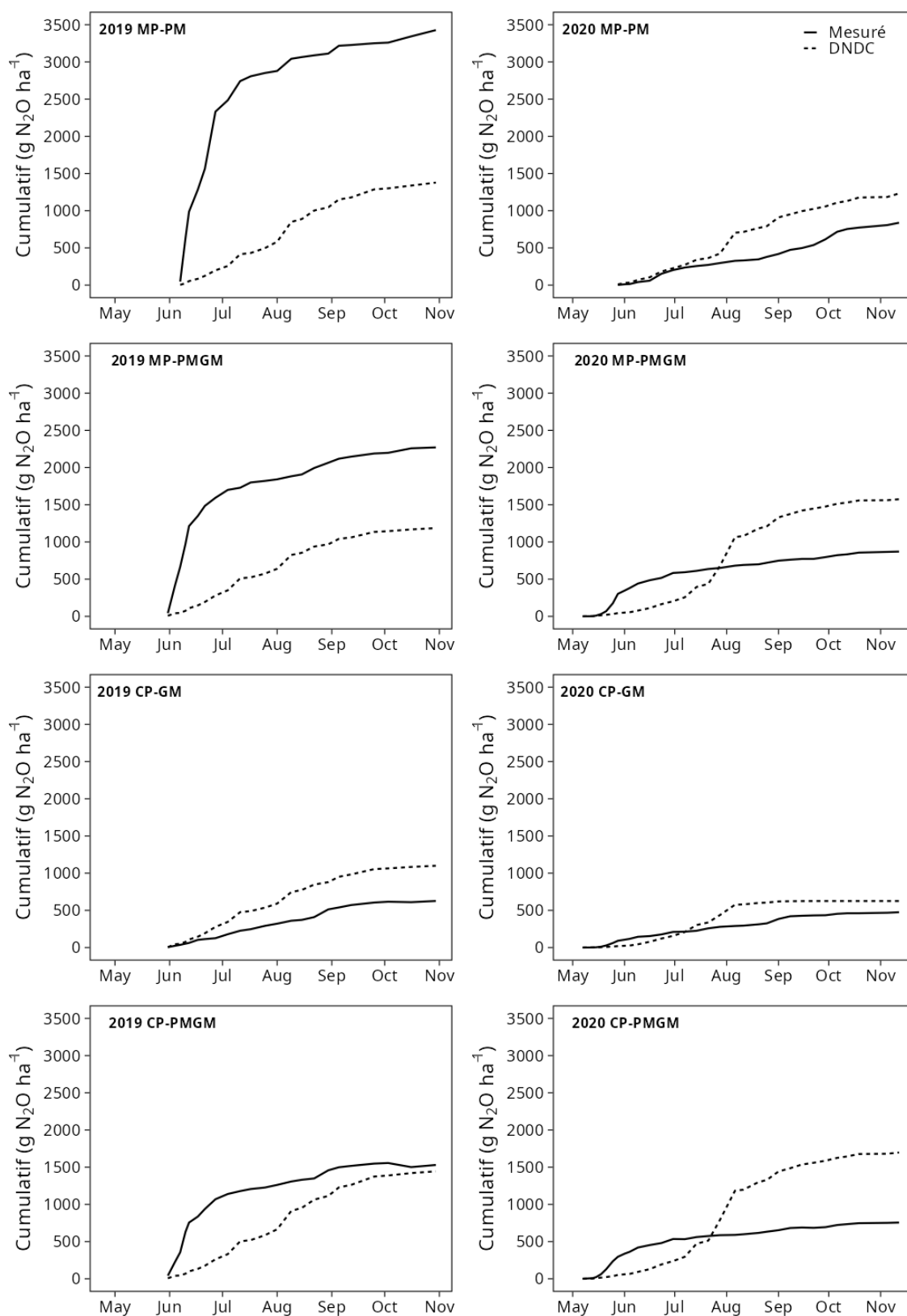


Figure 10. Cumulatif des émissions de N_2O mesurées (ligne pleine) et simulées avec le modèle DNDCv.CAN (ligne pointées) pour les traitements de travail de sol de labour (PM) et de chisel (CP), d'application de fumier (PM) et de cultures de couverture (GM) de l'étude de D'Amours et al. (2023).

3. Indicateurs de suivi

3.1. Nombre de professionnels et autres intervenants du secteur bioalimentaire qui déploient les outils d'aide à la décision :

On estime qu'un nombre considérable de conseillers et de producteurs agricoles au Québec se baseront sur les informations mentionnées dans la fiche synthèse, utilisée comme outil d'aide à la décision, pour une meilleure gestion environnementale de l'intégration des cultures de couverture dans les rotations de grandes cultures.

3.2. Nombre d'utilisateurs des connaissances transférées par Projet (p. ex. le nombre de lectures d'articles scientifiques) :

On estime que le nombre d'utilisateurs des connaissances transférées par ce projet sous forme d'article de vulgarisation ou de fiche de synthèse sera important.

3.3. Nombre de collaborations établies avec d'autres organismes de recherche au Québec, au Canada et à l'international :

Dans ce projet, plusieurs collaborations ont été établies entre le CÉROM et Université McGill, Université Laval, MAPAQ et le club agroenvironnemental Terre à Terre agronomes conseils au Québec. Lors du recensement des études dans le cadre de ce projet, plusieurs autres organismes au Québec, au Canada et aux États-Unis ont été contactés. Une entente de partage de données entre le CÉROM et AAC en Colombie-Britannique a été signée.

3.4. Estimation du potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre en tonne d'équivalent CO₂ qui seront réduits à la suite de l'implantation du Projet, de l'intervention ou de l'action et pour les années futures :

Malgré les informations limitées au Québec sur l'impact des CC sur les émissions de N₂O, les connaissances documentées dans ce projet pourraient guider les intervenants dans le secteur bioalimentaire dans une meilleure gestion agroenvironnementale des CC, ce qui permettra de réduire considérablement les émissions de N₂O à court, moyen et long terme.

DIFFUSION DES RÉSULTATS

Bilan final des activités de communication et de visibilité :

Suite à l'obtention de l'accord du soutien financier gouvernemental, le résumé de ce projet a été publié sur le site web du CÉROM et du partenaire financier Producteurs de grains du Québec. Une affiche synthétisant les principaux résultats a été présentée aux Journées horticoles et de grandes cultures à Saint-Rémi, Québec, le 28 novembre 2024. Un article de vulgarisation sera publié dans la revue Grains de la Terre chez nous le 7 mai 2025. Les résultats de ce projet seront aussi diffusés dans d'autres événements tel que les journées d'informations et/ou de formation spécifiques aux producteurs agricoles.

Nombre d'entreprises agricoles qui seront touchées par les résultats du projet :

On estime que les résultats de ce projet seront utiles pour un grand nombre d'entreprises agricoles spécialisées en grandes cultures ou cultures maraîchères, étant donné que plusieurs producteurs intègrent de plus en plus les cultures de couverture dans leurs rotations culturales dans l'optique de l'amélioration de la santé du sol et de la carboneutralité.

APPLICATION POSSIBLE POUR L'INDUSTRIE

Les résultats de cette revue de littérature ont permis de mieux clarifier les effets de différentes CC utilisées au Québec et en climat tempéré humide sur les émissions de N₂O en interaction avec d'autres pratiques culturales et les conditions pédoclimatiques, ce qui guidera les producteurs dans leur choix des pratiques à la fois rentables et durables. Plus spécifiquement, l'étude de l'effet des CC-légumineuses en combinaison avec la fertilisation azotée de la culture principale, permettra d'optimiser l'application des engrais azotés et de maximiser le profit économique tout en réduisant les émissions de N₂O.

PERSONNE-RESSOURCE (POUR INFORMATION)

Dalel Abdi, Ph.D., Chercheuse en régie de grandes cultures et plantes fourragères au CÉROM

450 464 2715 poste 236

dalel.abdi@cerom.qc.ca

www.cerom.qc.ca

740, Chemin Trudeau, Saint-Mathieu-de-Beloeil, QC J3G 0E2

Collaborateurs :

Marie Bipfubusa, Ph.D., CÉROM

Joann K. Whalen, Ph.D., Université McGill

Bérenger Bourgeois, Ph.D., Université Laval

Stéphanie Mathieu, agr., MAPAQ

Sylvie Thibaudeau, agr., M.Sc., Terre à Terre agronomes conseils

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Ce projet a été réalisé grâce au soutien financier du gouvernement du Québec dans le cadre du programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques dans le secteur bioalimentaire, qui découle du Plan pour une économie verte 2030, et au co-financement par les Producteurs de grains du Québec. www.quebec.ca/gouv/politiques-orientations/plan-economie-verte/

L'auteure remercie tous les intervenants dans le secteur agricole au Québec et ailleurs qui ont répondu à ce recensement d'études, spécifiquement les chercheurs qui ont partagé avec nous avec gracieuseté leurs rapports et données. Nous remercions aussi Mr. Alexis Latraverse pour les analyses statistiques et le développement des modèles de prédiction, et Mr. Pierre-Luc-Lizotte pour la validation du modèle DNDCv,CAN.

BIBLIOGRAPHIE

- AAC, 2023. Laboratoire vivant Québec. Rapport intérimaire, 2022-2023. 84 pages.
- Abalos, D., Jeffery, S., Drury, C. F., and Wagner-Riddle, C. (2016). Improving fertilizer management in the U.S. and Canada for N₂O mitigation: Understanding potential positive and negative side-effects on corn yields. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **221**, 214-221.
- Abdalla, M., Hastings, A., Helmy, M., Prescher, A., Osborne, B., Lanigan, G., Forristal, D., Killi, D., Maratha, P., Williams, M., Rueangritsarakul, K., Smith, P., Nolan, P., and Jones, M. B. (2014). Assessing the combined use of reduced tillage and cover crops for mitigating greenhouse gas emissions from arable ecosystem. *Geoderma* **223-225**, 9-20.
- Abdalla, M., Osborne, B., Lanigan, G., Forristal, D., Williams, M., Smith, P., and Jones, M. B. (2013). Conservation tillage systems: a review of its consequences for greenhouse gas emissions. *Soil Use and Management* **29**, 199-209.
- Bates D, Maechler M, Bolker B, Walker S (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *J. Stat. Soft.* 67(1): 1–48
- Basche, A. D., Miguez, F. E., Kaspar, T. C., and Castellano, M. J. (2014). Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation* **69**, 471-482.
- Behnke, G. D., and Villamil, M. B. (2019). Cover crop rotations affect greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA. *Field Crops Research* **241**.
- Bolker BM, Brooks ME, Clark CJ, Geange SW, Poulsen JR et al (2009). Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends Ecol. Evol.* 24(3):127–135.
- Breiman L, Friedman JH, Stone C, Olshen R (1984). Classification and regression trees. CRC Press.
- Bressler, A., and Blesh, J. (2023). A grass-legume cover crop maintains nitrogen inputs and nitrous oxide fluxes from an organic agroecosystem. *Ecosphere* **14**.
- CRAAQ. 2010. Guide de référence en fertilisation, 2e édition. Québec, Québec : Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 473 p.
- D'Amours, J., Pelster, D. E., Gagné, G., Wilkinson, J. A., Chantigny, M. H., Angers, D. A., and Halde, C. (2023). Combining reduced tillage and green manures minimized N₂O emissions from organic cropping systems in a cool humid climate. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **341**.
- D'Haene, K., Van den Bossche, A., Vandenbruwane, J., De Neve, S., Gabriels, D., and Hofman, G. (2008). The effect of reduced tillage on nitrous oxide emissions of silt loam soils. *Biology and Fertility of Soils* **45**, 213-217.
- Daryanto, S., Fu, B., Wang, L., Jacinthe, P.-A., and Zhao, W. (2018). Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. *Earth-Science Reviews* **185**, 357-373.
- Davis, B. W., Mirsky, S. B., Needelman, B. A., Cavigelli, M. A., and Yarwood, S. A. (2019). Nitrous oxide emissions increase exponentially with organic N rate from cover crops and applied poultry litter. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **272**, 165-174.
- Drury, C. F., Yang, X., Reynolds, W. D., Calder, W., Oloya, T. O., and Woodley, A. L. (2017). Combining Urease and Nitrification Inhibitors with Incorporation Reduces Ammonia and Nitrous Oxide Emissions and Increases Corn Yields. *J Environ Qual* **46**, 939-949.
- Duan, Y. F., Hallin, S., Jones, C. M., Prieme, A., Labouriau, R., and Petersen, S. O. (2018). Catch Crop Residues Stimulate N(2)O Emissions During Spring, Without Affecting the Genetic Potential for Nitrite and N(2)O Reduction. *Front Microbiol* **9**, 2629.
- Ejack, L., and Whalen, J. K. (2021). Freeze-thaw cycles release nitrous oxide produced in frozen agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils* **57**, 389-398.
- Ekwunife, K. C., Madramootoo, C. A., and Abbasi, N. A. (2021). Assessing the impacts of tillage, cover crops, nitrification, and urease inhibitors on nitrous oxide emissions over winter and early spring. *Biology and Fertility of Soils* **58**, 195-206.

- Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudik M, Ferrier S, Guisan A, Hijman RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2): 129-151.
- Elith J, Leathwick JR, Hastie T (2008). A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 77(4): 802-813.
- Fan, D., He, W., Smith, W. N., Drury, C. F., Jiang, R., Grant, B. B., Shi, Y., Song, D., Chen, Y., Wang, X., He, P., and Zou, G. (2022). Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils: A meta-analysis. *Glob Chang Biol* **28**, 5121-5141.
- Fiorini, A., Maris, S. C., Abalos, D., Amaducci, S., and Tabaglio, V. (2020). Combining no-till with rye (*Secale cereale* L.) cover crop mitigates nitrous oxide emissions without decreasing yield. *Soil and Tillage Research* **196**.
- Fouli (2021). GHG-Emissions-Canada-by crops-Models-Des statistiques.pdf>.
- Friedman JH (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29(5): 1189-1232.
- Friedman JH, Meulman JJ (2003). Multiple additive regression trees with application in epidemiology. *Statistics in Medicine*, 22(9): 1365-1381.
- Gagné, S., Halde, C., Brégar, A., Durocher, L. (2024). Rapport d'étape. Vers une production de grandes cultures bénéfique pour le climat - Comprendre la dynamique de l'azote et du carbone dans les maïs-grain et soya avec cultures de couverture intercalaires en fonction de l'espacement d'entre-rangs. 110 pages.
- Gao, Y., Borden, K. A., Brown, S. E., and Wagner-Riddle, C. (2023). Nongrowing season soil nitrous oxide emissions as influenced by cover crops and fall tillage termination. *Canadian Journal of Soil Science* **103**, 527-537.
- Giltrap, D. L., Li, C., and Saggar, S. (2010). DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **136**, 292-300.
- Hastie T, Tibshirani R, Friedman JH (2001). The elements of statistical learning. Springer series in statistics New York.
- He, Wentian, B. Dutta, B. B. Grant, M. H. Chantigny, D. Hunt, S. Bittman, M. Tenuta, D. Worth, A. VanderZaag, R. L. Desjardins et W. N. Smith. 2020. « Assessing the effects of manure application rate and timing on nitrous oxide emissions from managed grasslands under contrasting climate in Canada ». *Science of The Total Environment*, vol. 716, p. 135374.
- Hung, C.-Y., Ejack, L., and Whalen, J. K. (2021). Fall-applied manure with cover crop did not increase nitrous oxide emissions during spring freeze-thaw periods. *Applied Soil Ecology* **158**.
- Hung, C.-Y., and Whalen, J. K. (2021). Plausible impacts of fall manuring on cover crop production and spring nitrous oxide emissions under climate change in southern Quebec, Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **321**.
- Jarecki, M. K., Parkin, T. B., Chan, A. S. K., Kaspar, T. C., Moorman, T. B., Singer, J. W., Kerr, B. J., Hatfield, J. L., and Jones, R. (2009). Cover crop effects on nitrous oxide emission from a manure-treated Mollisol. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **134**, 29-35.
- Kröbel, R., Smith, W., Grant, B., Desjardins, R., Campbell, C., Tremblay, N., Li, C., Zentner, R., and McConkey, B. (2011). Development and evaluation of a new Canadian spring wheat sub-model for DNDC. *Canadian Journal of Soil Science* **91**, 503-520.
- Ladan, S., and Jacinthe, P.-A. (2017). Nitrogen availability and early corn growth on plowed and no-till soils amended with different types of cover crops. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **17 (1)**, 74-90.
- Langelier, M., Chantigny, M.H., Vanasse, A. 2021. Nitrogen-15 labelling and tracing techniques reveal cover crops transfer more fertilizer N to the soil reserve than to the subsequent crop. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 313:107359
- Lapierre, J., Machado, P. V. F., Debruyn, Z., Brown, S. E., Jordan, S., Berg, A., Biswas, A., Henry, H. A. L., and Wagner-Riddle, C. (2022). Winter warming effects on soil nitrate leaching under cover crops: A field study using high-frequency weighing lysimeters. *Frontiers in Environmental Science* **10**.
- Leathwick JR, Elith J, Francis MP, Hastie T, Taylor P (2006). Variation in demersal fish species richness in the oceans surrounding New Zealand: an analysis using boosted regression trees. *Marine Ecology Progress Series*, 321: 267-281.

- Leathwick J, Moilanen A, Francis M, Elith J, Taylor P, Julian K, Hastie T, Duffy C (2008). Dispersal, disturbance and the contrasting biogeographies of New Zealand's diadromous and non-diadromous fish species. *Journal of Biogeography*, 35: 1481–1497.
- Li, X., Petersen, S. O., Sørensen, P., and Olesen, J. E. (2015). Effects of contrasting catch crops on nitrogen availability and nitrous oxide emissions in an organic cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **199**, 382–393.
- Liang, C., MacDonald, D., Thiagarajan, A., Flemming, C., Cerkowniak, D., and Desjardins, R. (2020). Developing a country specific method for estimating nitrous oxide emissions from agricultural soils in Canada. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **117**, 145–167.
- Linton, N. F., Ferrari Machado, P. V., Deen, B., Wagner-Riddle, C., and Dunfield, K. E. (2020). Long-term diverse rotation alters nitrogen cycling bacterial groups and nitrous oxide emissions after nitrogen fertilization. *Soil Biology and Biochemistry* **149**.
- Machado, P. V. F., Farrell, R. E., Deen, W., Voroney, R. P., Congreves, K. A., and Wagner-Riddle, C. (2021). Contribution of crop residue, soil, and fertilizer nitrogen to nitrous oxide emissions varies with long-term crop rotation and tillage. *Sci Total Environ* **767**, 145107.
- Mehmandoust Kotlar, A., Singh, J., and Kumar, S. (2022). Prediction of greenhouse gas emissions from agricultural fields with and without cover crops. *Soil Science Society of America Journal* **86**, 1227–1240.
- Metay (2008). Modéliser N2O DIFFÉRENTS CULTURES.pdf.
- Muhammad, I., Sainju, U. M., Zhao, F., Khan, A., Ghimire, R., Fu, X., and Wang, J. (2019). Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* **192**, 103–112.
- Nouri, A., Lukas, S., Singh, S., Singh, S., and Machado, S. (2022). When do cover crops reduce nitrate leaching? A global meta-analysis. *Glob Chang Biol* **28**, 4736–4749.
- O'Brien, P. L., Emmett, B. D., Malone, R. W., Nunes, M. R., Kovar, J. L., Kaspar, T. C., Moorman, T. B., Jaynes, D. B., and Parkin, T. B. (2022). Nitrate losses and nitrous oxide emissions under contrasting tillage and cover crop management. *J Environ Qual* **51**, 683–695.
- Olofsson, F., and Ernfors, M. (2022). Frost killed cover crops induced high emissions of nitrous oxide. *Sci Total Environ* **837**, 155634.
- Parkin, T. B., Kaspar, T. C., Jaynes, D. B., and Moorman, T. B. (2016). Rye Cover Crop Effects on Direct and Indirect Nitrous Oxide Emissions. *Soil Science Society of America Journal* **80**, 1551–1559.
- Pelster, D. E., Chantigny, M. H., Royer, I., Angers, D. A., and Vanasse, A. (2021). Reduced tillage increased growing season N₂O emissions from a fine but not a coarse textured soil under the cool, humid climate of eastern Canada. *Soil and Tillage Research* **206**.
- Pelster, D. E., Matteau, J.-P., Farrell, R., and Hernandez Ramirez, G. (2024). Tillage effects on growing season nitrous oxide emissions in Canadian cropland soils. *Canadian Journal of Soil Science* **104**, 1–10.
- Pelster, D. E., Thiagarajan, A., Liang, C., Chantigny, M. H., Wagner-Riddle, C., Congreves, K., Lemke, R., Glenn, A., Tenuta, M., Hernandez-Ramirez, G., Bittman, S., Hunt, D., Owens, J., and MacDonald, D. (2023). Ratio of non-growing season to growing season N₂O emissions in Canadian croplands: an update to national inventory methodology. *Canadian Journal of Soil Science* **103**, 344–352.
- Petersen, S. O., Mutegi, J. K., Hansen, E. M., and Munkholm, L. J. (2011). Tillage effects on N₂O emissions as influenced by a winter cover crop. *Soil Biology and Biochemistry* **43**, 1509–1517.
- Pinheiro JC, Bates DM. Linear Mixed-Effects Models: Basic Concepts and Examples (2000). In: Mixed-Effects Models in S and S-PLUS. Statistics and Computing. Springer, New York, NY.
- Preza-Fontes, G., Christianson, L. E., Greer, K., Bhattarai, R., and Pittelkow, C. M. (2022). In-season split nitrogen application and cover cropping effects on nitrous oxide emissions in rainfed maize. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **326**.
- Pulido-Moncada, M., Petersen, S. O., and Munkholm, L. J. (2022). Soil compaction raises nitrous oxide emissions in managed agroecosystems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **42**.
- R Core Team (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- Reicks, G. W., Clay, D. E., Clay, S. A., Joshi, D. R., Moriles-Miller, J., Westhoff, S., Daigh, A. L. M., and Bruggeman, S. A. (2021). Winter cereal rye cover crop decreased nitrous oxide emissions during early spring. *Agronomy Journal* **113**, 3900-3909.
- Rochette, P., Angers, D. A., Chantigny, M. H., and Bertrand, N. (2008). Nitrous Oxide Emissions Respond Differently to No-Till in a Loam and a Heavy Clay Soil. *Soil Science Society of America Journal* **72**, 1363-1369.
- Rochette, P., Liang, C., Pelster, D., Bergeron, O., Lemke, R., Kroebel, R., MacDonald, D., Yan, W., and Flemming, C. (2018). Soil nitrous oxide emissions from agricultural soils in Canada: Exploring relationships with soil, crop and climatic variables. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **254**, 69-81.
- Saha, D., Basso, B., and Robertson, G. P. (2021a). Machine learning improves predictions of agricultural nitrous oxide (N₂O) emissions from intensively managed cropping systems. *Environmental Research Letters* **16**.
- Saha, D., Kaye, J. P., Bhowmik, A., Bruns, M. A., Wallace, J. M., and Kemanian, A. R. (2021b). Organic fertility inputs synergistically increase denitrification-derived nitrous oxide emissions in agroecosystems. *Ecol Appl* **31**, e02403.
- Singh, J., Kumar, S., and Jayaraman, S. (2022). Evaluation of the DNDCv.CAN model for simulating greenhouse gas emissions under crop rotations that include winter cover crops. *Soil Research* **60**, 534-546.
- Smith WN, Grant BB, Desjardins RL, Kroebel R, Li C, Qian B, Worth DE, McConkey BG, Drury CF (2013). Assessing the effects of climate change on crop production and GHG emissions in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **179**, 139–150.
- Smith, W., Grant, B., Qi, Z., He, W., VanderZaag, A., Drury, C. F., and Helmers, M. (2020). Development of the DNDC model to improve soil hydrology and incorporate mechanistic tile drainage: A comparative analysis with RZWQM2. *Environmental Modelling & Software* **123**.
- Taghizadeh-Toosi, A., Hansen, E. M., Olesen, J. E., Baral, K. R., and Petersen, S. O. (2022). Interactive effects of straw management, tillage, and a cover crop on nitrous oxide emissions and nitrate leaching from a sandy loam soil. *Sci Total Environ* **828**, 154316.
- Tatti, E., Goyer, C., Chantigny, M., Wertz, S., Zebarth, B. J., Burton, D. L., and Filion, M. (2014). Influences of over winter conditions on denitrification and nitrous oxide-producing microorganism abundance and structure in an agricultural soil amended with different nitrogen sources. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **183**, 47-59.
- Thapa, R., Mirsky, S. B., and Tully, K. L. (2018). Cover Crops Reduce Nitrate Leaching in Agroecosystems: A Global Meta-Analysis. *J Environ Qual* **47**, 1400-1411.
- Thomas, B. W., Hao, X., Larney, F. J., Goyer, C., Chantigny, M. H., and Charles, A. (2017). Non-Legume Cover Crops Can Increase Non-Growing Season Nitrous Oxide Emissions. *Soil Science Society of America Journal* **81**, 189-199.
- van Bochove, E., Jones, H. G., Bertrand, N., and Prévost, D. (2000). Winter fluxes of greenhouse gases from snow-covered agricultural soil: intra-annual and interannual variations. *Global Biogeochemical Cycles* **14**, 113-125.
- Wegner, B. R., Chalise, K. S., Singh, S., Lai, L., Abagandura, G. O., Kumar, S., Osborne, S. L., Lehman, R. M., and Jagadamma, S. (2018). Response of Soil Surface Greenhouse Gas Fluxes to Crop Residue Removal and Cover Crops under a Corn-Soybean Rotation. *J Environ Qual* **47**, 1146-1154.
- Yadav, D., and Wang, J. (2021). An improved UK-DNDC model for evaluations of soil temperature and nitrous oxide emissions from Canadian agriculture. *Plant and Soil* **469**, 15-37.
- Zuur A, Ieno EN, Elphick CS (2010). A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods Ecol. Evol.*; **1**(1): 3–14.

ANNEXE 1 : LES ARBRES DE RÉGRESSION « BOOSTÉS »

La méthode des BRT s'appuie sur des idées et des techniques à la fois des traditions statistiques et de l'apprentissage automatique (*Machine Learning* ou ML). Les BRT utilisent deux algorithmes : (1) les arbres de régression et de classification (*Classification And Regression Trees* ou CART), ou arbres de décision, et (2) le *boosting*.

Les CART divisent l'espace des prédicteurs (les variables explicatives) de manière à identifier les partitions de la variable réponse les plus homogènes par rapport à ces prédicteurs. Ils attribuent ensuite une constante à chacune de ces partitions, soit la classe la plus probable dans le cas des arbres de classification, ou la réponse moyenne des observations de la partition dans le cas des arbres de régression. Les prédicteurs et les points de division sont choisis de manière à minimiser l'erreur de prédiction. La croissance d'un arbre de décision fait intervenir des divisions binaires récursives : une division binaire est appliquée au résultat de la division précédente jusqu'à l'atteinte d'un critère d'arrêt prédéterminé.

Les CART possèdent plusieurs avantages par rapport aux méthodes d'analyses plus classiques. Les variables prédictives peuvent être de n'importe quel type (numérique, binaire, catégorique, etc.), les résultats du modèle ne sont pas affectés par les transformations monotones et les différences d'échelles de mesure des variables prédictives, et les variables prédictives non pertinentes sont rarement sélectionnées. Ils sont en outre insensibles à la colinéarité et aux valeurs extrêmes et ne sont pas affectés par la présence de données manquantes dans les variables prédictives (Breiman et al. 1984). Finalement, la structure hiérarchique des CART implique que la réponse à une variable dépend des valeurs des entrées plus élevées dans l'arbre, de sorte que les interactions entre variables prédictives sont automatiquement modélisées. Ces caractéristiques en font des outils très utiles pour l'analyse et la modélisation des données écologiques, en particulier dans un contexte exploratoire.

Les CART ont cependant aussi certains désavantages. Ils ont notamment de la difficulté à modéliser des fonctions continues, même celles aussi simples qu'une réponse linéaire. En outre, comme leur structure dépend de l'échantillon des données disponibles, de petits changements dans les données d'apprentissage peuvent résulter en des séries de divisions très différentes (Hastie et al. 2001). Ces facteurs introduisent donc de l'incertitude dans l'interprétation des CART et limitent leur performance prédictive.

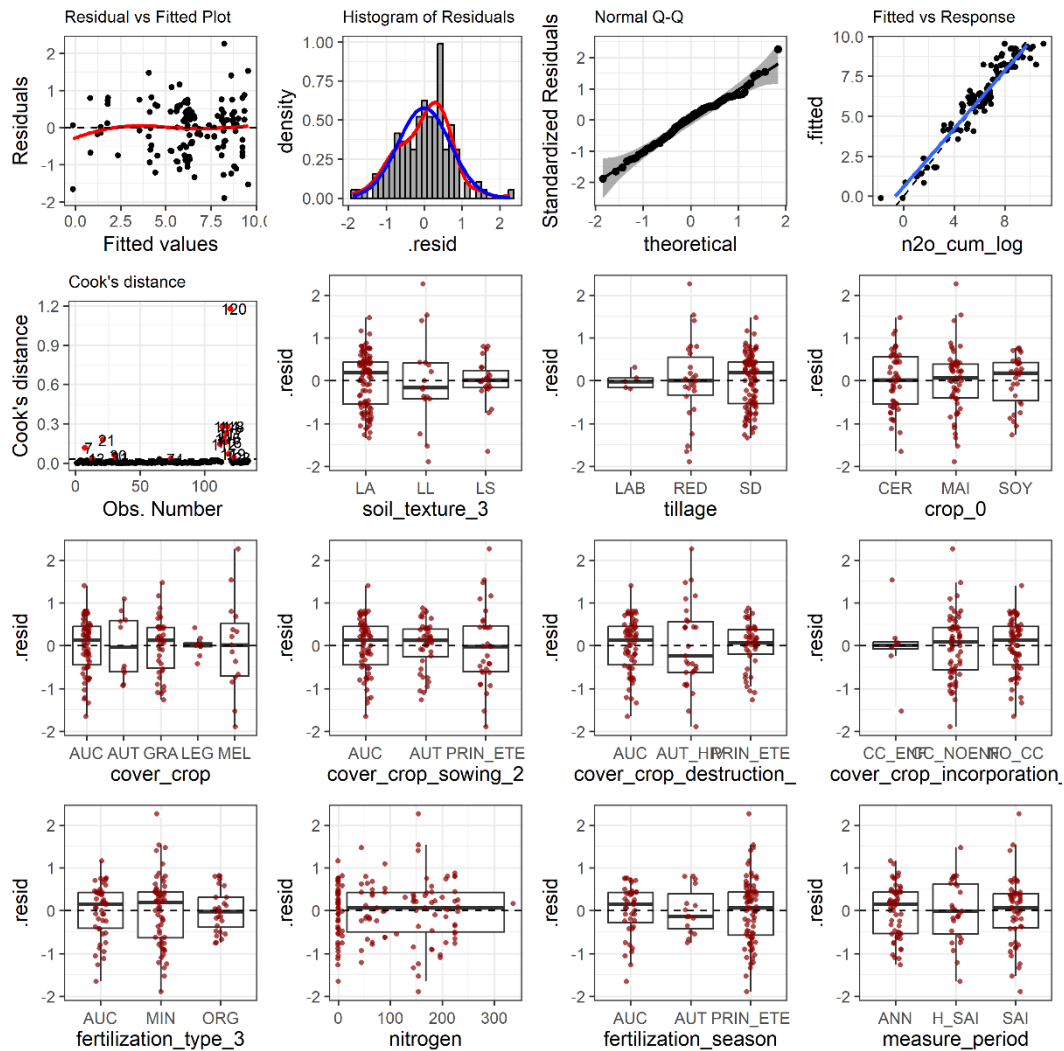
Les BRT corrigent ces désavantages en utilisant la technique du *boosting* pour combiner un grand nombre d'arbres de décision, afin d'optimiser la performance prédictive (Elith et al. 2006, 2008; Leathwick et al. 2006, 2008). Des CART sont ajustés de manière itérative aux données d'apprentissage pour mettre graduellement l'accent sur les observations mal ajustées ou mal prédites par l'ensemble des arbres existants. Le premier arbre est celui qui réduit au maximum la déviance (statistique de qualité de l'ajustement d'un modèle statistique) et chaque arbre suivant met l'accent sur les résidus, c.à.d. la variation de la réponse qui n'est pas expliquée jusqu'à présent par le modèle. À noter que, comme pour les GLM, les BRT peuvent être appliqués à différents types de variables réponses (Normale, Poisson, binomial, etc.).

L'un des problèmes majeurs des algorithmes d'apprentissage machine est le surajustement, ou surapprentissage, des modèles aux données d'apprentissage (*overfitting*). Le surajustement survient lorsqu'un modèle est inutilement complexe et prend en compte la variation aléatoire (c.à.d. le bruit) dans les données au lieu d'apprendre et de comprendre la structure sous-jacente. Pour tous les problèmes de prédiction, le surajustement réduit leur généralité. Pour éviter ce problème, des méthodes dites de régularisation sont utilisées pour contraindre la procédure afin d'équilibrer l'ajustement et la performance prédictive du modèle (Hastie et al. 2001). La régularisation est particulièrement importante pour les BRT, car leur nature séquentielle permet à des arbres d'être ajoutés jusqu'à ce que les données soient totalement surajustées.

La simplification des modèles de BRT est obtenue en appliquant un « rétrécissement » (*shrinkage*) à chaque étape qui réduit la contribution de chaque arbre supplémentaire (Friedman, 2001). Cette simplification s'effectue en optimisant quatre paramètres : le nombre d'arbres (*nt*), le taux d'apprentissage (*learning rate* ou *lr*), la complexité de l'arbre (*tree complexity* ou *tc*), et la « fraction de sac » (*bag fraction* ou *bf*). Le taux d'apprentissage définit le poids appliqué aux arbres individuels afin de réduire la contribution de chaque nouvel arbre ajouté au modèle. Des valeurs de *lr* plus petites augmenteront le nombre d'arbres requis. La complexité de l'arbre représente le nombre de nœuds dans chaque arbre et permet de contrôler la profondeur d'interaction. La « fraction de sac » est la proportion de données sélectionnées au hasard (et sans remplacement) à chaque étape pour ajuster chaque nouvel arbre.

ANNEXE 2 : ÉVALUATION DES MODÈLES LINÉAIRES

Modèle complet



Modèle réduit

