

TITRE DU PROJET

Mesures et interprétations d'indicateurs de la santé et conservation des sols dans le cadre d'un dispositif de longue durée en grandes cultures biologiques

NUMÉRO DU PROJET

20-010-3.1-S-CETAB

DURÉE DU PROJET

Avril 2020 / Mai 2024

RAPPORT FINAL

Réalisé par :

Gilles Gagné, M.Sc.
Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique
et de proximité (CETAB+)
et
Michaël Leblanc, Ph.D.

DATE

31 mai 2024

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

TITRE DU PROJET :

MESURES ET INTERPRÉTATIONS D'INDICATEURS DE LA SANTÉ ET CONSERVATION DES SOLS
DANS LE CADRE D'UN DISPOSITIF DE LONGUE DURÉE EN GRANDES CULTURES BIOLOGIQUES

NUMÉRO DU PROJET :

20-010-3.1-S-CETAB

RÉSUMÉ DU PROJET

Ce projet a consisté à mesurer des indicateurs associés à la santé et la conservation des sols durant les saisons de croissance 2020, 2021 et 2022 sur les parcelles du dispositif de longue durée en grandes cultures biologiques mis en place sur la ferme expérimentale du CETAB+ au printemps 2019. Ce dispositif expérimental comprend quatre séquences agronomiques, soit différentes rotations de cultures annuelles (maïs-grain, soya, céréales) dont une inclut une prairie, ainsi que des traitements de référence (prairie permanente et jachère avec sol à nu) et un itinéraire innovateur en semis direct sous couvert végétal. Les principales variables selon les séquences agronomiques sont le travail du sol de surface (labour ou travail réduit) et l'utilisation ou non d'engrais de ferme (fumier de poulet) à des fins de fertilisation. Il y a ainsi 15 traitements avec quatre répétitions pour un total de 60 parcelles expérimentales d'une dimension de 6 mètres par 20 mètres. Le sol de surface est un loam sableux, une classe texturale particulièrement sensible à la dégradation de la structure (pulvérisation, battance, érosions hydrique et éolienne) et à la diminution de la teneur en matière organique (MO). Pour les sols de surface, en plus d'analyses de routine (matière organique, pH, éléments nutritifs), des mesures de la stabilité des agrégats, de la masse volumique apparente (MVA), du carbone labile (POxC) et de l'activité biologique (test Solvita) ont été effectuées plusieurs fois par saison de croissance sur les 60 parcelles du dispositif durant les trois années du projet afin de documenter l'évolution de l'état de la santé des sols associé aux pratiques agricoles expérimentées. Les principaux résultats sont les suivants :

- diminution annuelle généralisée dans le temps de la teneur en pourcentage de la MO du sol de surface, mais sans effet significatif selon les 15 traitements;
- diminution annuelle généralisée dans le temps de la teneur en t/ha de la MO dans la couche 0-20 cm sauf pour la séquence 3;
- augmentation annuelle généralisée de la teneur en carbone labile (POxC);
- légère tendance annuelle à la hausse de l'activité biologique (test respiration Solvita);
- tendance annuelle similaire de la MVA, soit à la baisse ou à la hausse, pour les traitements d'une même séquence agronomique;
- tendance annuelle à la baisse de la stabilité des agrégats de 1 à 2 mm;
- tendance annuelle à la baisse de la stabilité des agrégats de 2 à 4 mm;
- selon l'analyse des rendements des séquences agronomiques, la stabilité des agrégats de 2 à 4 mm échantillonnés en août, l'activité biologique selon le test Solvita effectué en août et la mesure de la MVA en mai sont les meilleurs indicateurs pour expliquer le rendement des cultures, en excluant les pratiques culturales et les variables climatiques.

Référence proposée

Gagné G. et Leblanc M. 2024. Mesures et interprétations d'indicateurs de la santé et conservation des sols dans le cadre d'un dispositif de longue durée en grandes cultures biologiques. Rapport final. Projet numéro 20-010-3.1-S-CETAB. Programme Prime-Vert. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 59 pages.

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

L'objectif général de ce projet était de documenter les effets de pratiques agricoles actuelles et innovantes sur des indicateurs de la santé de sols minéraux de surface durant trois ans dans le cadre d'un dispositif expérimental de longue durée en grandes cultures biologiques (DLD-GCB) mis en place en 2019 sur la ferme expérimentale du CETAB+ située à Victoriaville. Utilisés précédemment dans le cadre d'une alternance de cultures de soya et de maïs-grain en mode conventionnel, les sols du site expérimental ont fait l'objet d'un léger nivelage et d'un drainage souterrain aux 7 mètres en 2017. Un chaulage a été effectué après ces travaux afin de viser un pH-eau entre 6,5 et 7,0. Du sulfate de potassium est épandu à la volée tôt au printemps selon l'analyse de sol de la parcelle, l'application ou non d'engrais de ferme et la culture.

Deux séries de sols sableux d'origine fluvio-marine sont présentes sur ce site. La série Saint-Samuel est en dominance, un gleysol humique, alors que la série Saint-Jude, un podzol humo-ferrique gleyfié, se retrouvait à l'origine sur de petites buttes naturelles. La classe texturale du sol de surface est un loam sableux (moyenne de 77% sable et de 10% argile), une classe texturale sensible à la dégradation de la structure (pulvérisation, battance), aux érosions hydrique et éolienne et à la diminution de la teneur en matière organique (MO). C'est aussi une classe texturale qui se prête bien au travail primaire du sol avec un chisel et à un labour printanier.

Ce dispositif expérimental comprend quatre séquences agronomiques, soit différentes rotations de cultures annuelles (maïs-grain, soya, céréales) dont une inclut une prairie (mélange graminées et légumineuses), ainsi que des itinéraires de référence (prairie permanente et jachère avec sol à nu) et un itinéraire novateur en semis direct sous couvert végétal (SDCV).

Les rotations de culture pour les séquences 1 à 4 de 2019 à 2022 sont :

Séquence 1 : Céréale, Maïs-grain, Soya et Céréale

Séquence 2 : Soya, Céréale, Soya et Soya

Séquence 3 : Maïs-grain, Soya, Prairie avec céréale en plante abri et Prairie

Séquence 4 : Céréale, Céréale, Maïs-grain et Soya.

La céréale est soit un blé ou soit une orge. Après le battage des grains, les pailles des céréales et les tiges de maïs-grain sont fauchés et déchiquetés et distribués uniformément sur la surface de la parcelle. Un engrais vert de légumineuse (habituellement du trèfle rouge) est semé dans le sillon en même temps que la céréale, donc à la même profondeur, alors qu'en dérobé de la récolte de cette céréale un pois fourrager a été semé. Pour le maïs-grain, un trèfle rouge a été semé avec un semoir Jang dans les entre-rangs après le dernier sarclage, mais sa croissance fut généralement très faible.

Les principales variables selon les séquences agronomiques 1 à 4 sont le travail du sol de surface (labour ou travail réduit, soit chisel ou scalpeur, au printemps ou à l'automne) et l'utilisation ou non d'engrais de ferme (fumier de poulet) à des fins de fertilisation. À titre informatif, mentionnons qu'un scalpeur est un outil de travail réduit du sol à dents tranchantes qui travaille superficiellement le sol à plat à une profondeur de pénétration allant de 3 à 10 cm selon le besoin. Plus d'informations sur les itinéraires agronomiques et le dispositif expérimental sont présentées à l'annexe 1 (Figures 1 et 2). Il y a ainsi 15 traitements avec quatre répétitions pour un total de 60 parcelles expérimentales d'une dimension de 6 mètres par 20 mètres.

Les objectifs spécifiques du projet consistaient à mesurer des propriétés agropédologiques modifiables pour chacune des parcelles du DLD-GCB, soit les cinq indicateurs suivants : l'agrégation (proportion et stabilité des agrégats), la masse volumique apparente (MVA), la teneur en carbone labile et l'activité biologique.

Pour les sols de surface de chacune des parcelles du DLD-GCB, le protocole expérimental selon les indicateurs a été effectué de deux à cinq fois par année. Les moments d'échantillonnage durant la saison de croissance ont été choisis en fonction notamment des pratiques culturales, de la période de l'année et des fonds disponibles. À chaque échantillonnage, les sols situés près des bordures des parcelles ont été exclus des points d'échantillonnage. Dans le cas des cultures annuelles de soya ou de maïs-grain (8 rangs) et selon l'indicateur, les deux entre-rangs non soumis aux passages de roues de la machinerie agricole (semer, désherbage, récolte) ont été privilégiés pour l'échantillonnage, soit l'entre-rang 2-3 et l'entre-rang 6-7. Notons que pour certains indicateurs, la couche de sol de 0 à 5 cm a été exclue étant donné les travaux de désherbages effectués pour les cultures annuelles. Enfin, les échantillonnages ont été effectués avant les travaux primaires des sols, et ce tant pour ceux au printemps que pour ceux en automne. Voici un résumé de la méthodologie utilisée pour chacun des indicateurs mesurés.

1) La masse volumique apparente (MVA). La MVA a été mesurée à l'aide d'un cylindre creux enfoncé à la verticale dans le sol de la parcelle entre 5 et 10 cm de profondeur. Un cylindre d'une hauteur de 5 cm et d'un diamètre intérieur de 6,3 cm a été utilisé (volume interne de 155,86 cm³). Les échantillons de sols ont été séchés à l'étuve à 105 C pendant au moins 24 h ou jusqu'à ce que le poids soit constant. Les résultats sont exprimés sur une base sèche en gr/cm³. Soulignons que la MVA est aussi un indicateur de la porosité totale, plus la MVA est faible plus le pourcentage d'air, et donc d'oxygène, dans le sol est élevé.

2) La proportion d'agrégats de sols de plus de 2 mm. La proportion d'agrégats d'un diamètre de plus de 2 mm a été évaluée selon la proportion massique d'agrégats entre 2 et 6 mm par rapport au poids total sec de l'ensemble des agrégats de 0 à 6 mm. Pour ce faire, un bloc de sol de surface d'environ 10 cm x 10 cm x 10 cm a été prélevé aléatoirement par parcelle avec une petite truelle entre 5 et 15 cm de profondeur. Le sol de ce bloc a été tamisé délicatement directement au champ avec un tamis de 6 mm, puis déposé dans un contenant rigide d'un litre et ensuite laissé à sécher à l'air libre au laboratoire pendant au moins 3 mois. Un tamisage subséquent en laboratoire avec le sol séché a permis de distinguer les deux fractions sur une base massique (agrégats de plus de 2 mm et agrégats de 2 mm et moins) et ainsi d'effectuer le calcul du pourcentage d'agrégats de plus de 2 mm.

3) La stabilité des agrégats 1 à 2 et 2 à 4 mm. À partir de l'échantillon d'agrégats secs de 2 mm et moins effectué précédemment, un sous-échantillon d'agrégats de 1 à 2 mm a été obtenu avec un tamis de 1 mm. De même, à partir de l'échantillon d'agrégats secs de 2 mm et plus, un sous-échantillon d'agrégats de 2 à 4 mm a été obtenu avec un tamis de 4 mm. La stabilité de ces agrégats entre 1 et 2 mm et entre 2 et 4 mm a été mesurée avec un appareil *Wet sieving apparatus* de la compagnie Eijkelkamp selon la méthodologie spécifiée par le fabricant. Avec cet appareil, un tamis du manufacturier de 0.25 mm a été utilisé pour les agrégats entre 1 et 2 mm alors qu'un tamis du manufacturier de 2 mm a été utilisé pour les agrégats entre 2 et 4 mm. Pour chacune des fractions, les résultats sont exprimés en pourcentage d'agrégats stables sur une base de poids sec.

4) L'activité biologique via l'émission de CO₂. Sur une épaisseur de 0 à 10 cm en surface et en excluant les résidus végétaux, cinq échantillons de sols par parcelle ont été prélevés en vrac avec une truelle. Ces cinq échantillons de sols ont été tamisés directement au champ avec un tamis de 6 mm et homogénéisés. Ensuite, un récipient identifié a été rempli avec ce sol et celui-ci a été conservé au frais dans une glacière sur le terrain et ensuite dans une chambre froide à 4 degrés Celsius. Au laboratoire, l'activité biologique a été mesurée avec des sols frais (aucun séchage) prélevés depuis moins de 24 heures selon la méthode développée par la compagnie Solvita (voir <https://solvita.com/fieldtest/>). En résumé, une quantité de 90 grammes du sol prélevé est insérée dans un pot, une languette-sonde indicatrice par colorimétrie de la teneur en CO₂ émise par le sol est enfoncée dans le sol, et le pot est ensuite fermé à l'aide d'un couvercle scellant. Le gel indicateur de la languette est situé à l'air libre en haut de la languette insérée dans le sol. Plus il y a de CO₂ émis par le sol, plus la couleur du gel est modifiée. Après 24 heures, une lecture de la couleur du gel de la languette avec un colorimètre (*Solvita Digital Color Reader*) est effectuée. Les résultats sont exprimés en ppm de CO₂ ou en mg de CO₂ par kg de sol.

5) Le carbone labile. Un sous-échantillon du sol prélevé lors de l'échantillonnage pour l'activité biologique a été séché et tamisé à 2 mm. Avec ce sous-échantillon, la quantité de carbone labile a été extraite au permanganate [POxC] et mesurée avec un spectrophotomètre selon la méthode développée par Weil et al. (2003). Les résultats sont exprimés en quantité (mg/kg de sol).

En 2020, les dates des campagnes d'échantillonnage ont été le 6 mai, 9 juin, 13 août, 16 septembre et 22 octobre. Pour 2021, ces dates ont été le 29 avril, 9 juin, 15 juillet, 18 août et 30 septembre afin de couvrir plus uniformément la saison de croissance et ses variations pédoclimatiques en lien avec les pratiques agricoles. Pour 2022, les dates des trois campagnes d'échantillonnage ont été le 5 mai, 11 août et 11 octobre, mais à ces dates ce n'est pas tous les indicateurs qui ont été mesurés étant donné des contraintes budgétaires. Il a été décidé que le carbone labile POxC et la respiration Solvita ne seraient pas mesurés pour l'échantillonnage du 11 octobre étant donné que la saison de croissance était terminée alors que la stabilité des agrégats n'a été mesurée que pour l'échantillonnage du 11 octobre afin d'avoir des données de fins de saison de croissance pour chacune des années. Pour l'ensemble du projet, il y a eu 780 mesures de la MVA, 780 mesures de la proportion massique d'agrégats de sols de plus de 2 mm, 420 mesures de la stabilité des agrégats 1 à 2 mm, 420 mesures de la stabilité des agrégats de 2 à 4 mm, 720 mesures de l'activité biologique (test Solvita) et 720 mesures du carbone labile (POxC) pour un total de 3840 mesures.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS¹

Matière organique (MO)

En 2019, 2020 et 2022, des échantillonnages du sol de surface sur une épaisseur de 0-20 cm ont été effectués tôt en mai avant les travaux primaires du sol sur chacune des 60 parcelles. Les échantillons ont été transmis à un laboratoire accrédité pour les analyses standards (pH, MO, éléments nutritifs disponibles). Les pourcentages de matière organique des sols de surface ont significativement diminué pour l'ensemble des traitements dans le temps de 2019 à 2022. Étant donné l'amélioration des sols effectuée en 2017 et 2018 (nivelage, drainage souterrain, chaulage), il est normal que la minéralisation de la MO soit augmentée et donc qu'une diminution des teneurs totales de MO soit constatée durant les premières années du dispositif.

Le facteur *traitement* n'a pas montré d'effet significatif sur le contenu en MO du sol, alors que le facteur *date d'échantillonnage* était significatif (Tableau 1¹). Aucune différence significative du pourcentage de MO n'a été détectée selon les séquences, le travail primaire du sol et les apports ou non de fumier de poulet. Le contenu en MO a diminué entre 2019 et 2022 à un taux linéaire variant de -0.061 à -0.252 % par année (Figures 3 et 4). Néanmoins, pour certains traitements (T08, T09, T10, T14), cette tendance à la baisse n'est pas significativement différente d'une tendance nulle (aucune variation de la MO). Le traitement de référence en prairie permanente (T14) présente le taux de variation le plus faible, bien que les taux de variation ne soient pas significativement différents d'un traitement à l'autre. Pour les séquences 1 et 3, les traitements avec labour semblent présenter une influence plus marquée sur la diminution de la teneur en MO que les traitements avec chisel, mais cet ordre est inversé pour la séquence 4.

En effectuant un bilan massique des quantités de MO pour la couche de 0-20 cm en utilisant pour ceci la valeur mesurée de la MVA en mai 2020 et en mai 2022 et le pourcentage de MO pour le même mois, la séquence 3 se distingue puisque, sur une base de tonnes à l'hectare, la quantité de MO a augmenté légèrement entre ces deux moments (Tableau 2) étant donné l'augmentation de la masse volumique apparente (MVA) mesurée entre 5 et 10 cm. Les trois traitements de cette séquence ont ainsi vu leur teneur en MO augmentée de 2,6 à 8,0% pour une moyenne de 5,6%, ce qui la distingue des séquences 1, 2 et 4 qui ont vu cette quantité diminuée de -6 à -24,2%, pour une moyenne de -17%. L'implantation de la prairie en 2021 pour la séquence 3 semble être la raison de ce contraste (augmentation de la MVA). Remarquons cependant que la quantité moyenne initiale de MO en 2020 pour les 12 parcelles de la séquence 3, soit 106,8 t/ha, était plus faible que la moyenne des 36 parcelles des séquences 1, 2 et 4, soit 127,1 t/ha. Mais cette évaluation de la quantité moyenne de MO par couche devrait idéalement reposer sur trois mesures de MVA pour au moins trois couches (0-10, 10-20 et 20-30 cm) avec une mesure du contenu en carbone organique pour chacune de celles-ci. En étroite collaboration avec le CRD de Québec d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), un échantillonnage composite par couches (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 et 40-60 cm) a été effectué en mai 2019 et en octobre 2021 (3 saisons de culture) pour les 60 parcelles avec un échantillonneur mécanique (Giddings) pour suivre l'évolution des quantités de carbone organique selon les séquences et les traitements. Les données obtenues sont présentement analysées par la chercheuse Émilie Maillard d'AAC et un autre échantillonnage similaire est prévu en octobre de cette année, donc après 6 saisons de culture. Des résultats préliminaires pour la couche 0-20 cm ont été présentés par Mme Maillard au colloque Bio pour tous! de 2024 et l'on ne constate aucune différence significative après trois ans.

Par ailleurs et pour la même période de deux ans, le traitement de référence en prairie permanente a vu sa quantité moyenne de MO passée de 130,1 à 117,4 t/ha, soit une différence de -9,7%, alors que cette diminution a été de -12,7% pour le traitement sol nu. Notons que le travail du sol pour ce dernier traitement consiste à faire un passage de déchaumeuse en surface au besoin pour désherber les parcelles.

Carbone labile (POxC)

La quantité de carbone labile (soit facilement accessible ou utilisable), parfois désigné carbone actif, est un indicateur de la disponibilité de matière organique comme source

¹ Toutes les figures et tableaux de cette section sont en annexe

d'énergie et de nourriture pour les micro-organismes du sol (*soil food web*). Cette quantité est mesurée au laboratoire par colométrie à la suite d'une extraction avec une solution de permanganate de potassium. C'est aussi un indicateur précoce de l'accumulation de matière organique récente (ex. cultures de couverture, résidus de culture). Dans le cadre de cette étude, le facteur *traitement* n'a pas montré d'effet significatif sur la teneur en carbone labile du sol, mais le facteur *date d'échantillonnage* a montré un effet significatif sur la teneur en POxC, excepté pour l'année 2022 (Tableau 3; Figure 5). La teneur en POxC a augmenté entre 2020 et 2022 pour l'ensemble des traitements à un taux linéaire variant de 29,24 à 60,36 mg kg⁻¹ par année (Figures 6 et 7). Bien que le taux de variation ne soit pas significativement différent d'un traitement à l'autre, les traitements avec labour semblent présenter une influence moins marquée sur la variation de la teneur en POxC que les autres traitements. D'ailleurs, pour les traitements T01 et T10, cette tendance à la hausse n'est pas significativement différente d'une tendance nulle.

Respiration du sol (test Solvita)

La respiration du sol est un indicateur de l'activité et de l'abondance des micro-organismes vivants du sol, donc c'est également un indicateur de l'indice de la minéralisation de la MO et ainsi de la mise en disponibilité d'éléments nutritifs contenus dans la MO comme l'azote. La température du sol, la teneur en eau et en oxygène du sol et la disponibilité de nourriture (carbone assimilable, sucre et azote) sont les principaux facteurs influençant cette respiration. Les conditions climatiques (précipitations, température), l'agrégation du sol et le ressuyage du sol ont donc une influence importante sur le taux de respiration du sol. Les analyses de variance montrent que les facteurs *date d'échantillonnage* et *traitement* ont eu des effets significatifs sur la respiration du sol (Tableau 4). Au printemps 2020, un an après la mise en place du dispositif, la respiration du traitement sol nu est significativement inférieure à plusieurs traitements dont celui de la prairie permanente (Figures 8 et 9). Cependant, en raison des conditions édaphiques, pour certaines dates (p. ex. août 2020 et mai 2022) les traitements, incluant le sol nu, ne présentent pas de taux de respiration significativement différent. En revanche, au mois d'août 2022, des écarts plus importants ont été observés entre les traitements et ce sont notamment les traitements chisel avec fumier (T02, T08, T11) et prairie permanente (T14) qui ont montré les moyennes les plus élevées. À cette même date, les traitements labour avec fumier (T01, T07, T10) ont montré les moyennes les plus faibles de leur séquence respective. D'ailleurs, les respirations moyennes des traitements T10 et T11 sont significativement différentes. Par contre, les taux de variation annuelle ne sont généralement pas significativement différents entre les traitements (Figures 10 et 11), bien qu'ils soient globalement positifs, ce qui est de bon augure en ce qui concerne l'amélioration de la fertilité des sols du site. Seuls les traitements scalpeur sans fumier (T12) et prairie permanente (T14) ont des taux significativement différents d'une tendance nulle avec des variations annuelles de 4,57 et 4,33 mg C-CO₂ kg⁻¹, respectivement. Les traitements T01 et T10 (labour avec fumier) présentent les taux les plus faibles avec des variations annuelles de 0,63 et -0,31 mg C-CO₂ kg⁻¹, respectivement. En résumé, la respiration du sol, et donc l'activité biologique, est favorisée par un travail réduit du sol (chisel et scalpeur) alors que la date d'échantillonnage doit être choisie avec discernement selon les conditions climatiques afin d'obtenir des mesures représentatives de l'effet des itinéraires.

Masse volumique apparente (MVA)

Les analyses de variance montrent que la MVA a été affectée significativement par les facteurs *date d'échantillonnage* et *traitement* (Tableau 5). De plus, excepté pour l'année

2022, l'effet du traitement sur la MVA a interagi significativement avec la date d'échantillonnage. Les écarts entre les traitements les plus importants ont été observés en 2020 où les traitements de la séquence 1 étaient significativement différents de ceux de la séquence 4 (Figures 12 et 13). La MVA a évolué à la baisse ou à la hausse à des taux annuels variant de -0,110 à 0,048 g cm⁻³ (Figures 14 et 15). L'évolution de la MVA par traitement est relativement constante à l'intérieur de chacune des séquences. Seuls les traitements de la séquence 4 (T10, T11, T12) présentent des taux de variation significativement différents de zéro. Les taux de variation des traitements labour avec fumier (T01) et chisel avec fumier (T02) de la séquence 1 sont significativement différents de ceux des traitements labour avec fumier (T10) et chisel avec fumier (T11) de la séquence 4. C'est principalement une relation entre la date d'échantillonnage et le dernier travail du sol. En effet, la MVA en mai est plus élevée lorsque le travail du sol est au printemps (échantillonnage de la MVA avant ce travail) et plus faible lorsque le travail du sol a été réalisé l'automne précédent. D'autres facteurs liés à la séquence pourraient aussi expliquer les variations de la MVA de la couche de surface. La variation importante des données selon la date d'échantillonnage indique l'importance d'effectuer relativement au même moment les mesures de MVA à diverses fins comme pour mesurer l'évolution des quantités de carbone organique par couche de sol sur une base de tonne à l'hectare.

Proportion d'agrégats > 2 mm

Les analyses de variance montrent que la proportion massique d'agrégats de plus de 2 mm par rapport à ceux de 0 à 6 mm a été affectée significativement par le facteur *traitement* à toutes les années et par le facteur *date d'échantillonnage* en 2020 et 2021 (Tableau 6). Par contre, ces différences s'observent ponctuellement à certaines dates d'échantillonnage et uniquement pour certains traitements (Figures 16 et 17). Par ailleurs, les taux de variation annuelle ne sont pas significativement différents entre les traitements (Figures 18 et 19) et aucun traitement n'est significativement différent d'une tendance nulle. Les analyses statistiques démontrent que cet indicateur n'a pas engendré de discrimination importante entre les séquences et les traitements (en excluant le sol nu). Il s'est donc avéré peu utile dans le cadre de ce dispositif pour la période d'expérimentation étudiée.

Stabilité des agrégats 1-2 mm

Les analyses de variance montrent que la stabilité des agrégats 1 à 2 mm a été affectée significativement par les facteurs *date d'échantillonnage* et *traitement* en 2020 (5 mesures) et par le facteur *traitement* en 2022 (une seule mesure en 2021 et 2022) (Tableau 7; Figures 20 et 21). Les taux de variation annuelle montrent une tendance à la baisse de la stabilité des agrégats 1 à 2 mm (Figures 22 et 23). Notons que cette variation de la stabilité est plus faible avec les traitements avec travail du sol par le labour pour les séquences 3 et 4, possiblement que les agrégats sont moins sujets à un contact agressif, et donc désagrégateur, avec le labour par rapport au chisel et au scalpeur.

Stabilité des agrégats 2-4 mm

Les analyses de variance montrent que la stabilité des agrégats 2 à 4 mm a été affectée significativement par les facteurs *date d'échantillonnage* et *traitement* (Tableau 8) en 2020 (5 mesures) et par le facteur *traitement* en 2021 et 2022 (une seule mesure par année). L'effet *traitement* a été plus marqué à certaines dates et plus particulièrement en septembre 2021 (Figures 24 et 25). Le traitement sol nu a montré les plus faibles valeurs moyennes dès les premiers mois de l'étude. Les taux de variation annuelle montrent une légère tendance à la

baisse de la stabilité des agrégats 2 à 4 mm (Figures 26 et 27). Cette tendance à la baisse est moins marquée pour le labour dans leur séquence respective (1, 3 et 4) comme ce fût le cas comme pour les agrégats de 1 à 2 mm.

Analyse globale des indicateurs

Une analyse discriminante linéaire a été effectuée avec toutes les données des indicateurs (carbone labile, respiration Solvita, MVA, % agrégation de plus de 2 mm, stabilité des agrégats de 1-2 mm et de 2-4 mm) afin d'évaluer si ces propriétés de sol permettent de différencier les séquences agronomiques 1 à 4 et leurs traitements ainsi que les traitements de référence (prairie permanente et jachère avec sol à nu). La figure 28 montre que les séquences sont bien discriminées par les indicateurs, mais dans une moindre mesure pour la séquence 4 (T10, T11, T12) qui chevauche les autres séquences. Les traitements des séquences 1, 2 et 3 sont relativement bien regroupés selon les deux premiers axes discriminants. Il semble donc que l'effet des traitements sur les indicateurs de santé des sols est d'abord lié aux pratiques intra-séquences (cultures, précédents culturaux, période du travail de sol). Notons que le traitement jachère sol nu est bien discriminé des autres traitements et que le traitement prairie permanente chevauche les traitements de la séquence 3 qui à partir de 2021 incluait aussi une prairie.

Analyse des rendements en relation avec les indicateurs

Des modèles ont été élaborés par apprentissage automatique afin d'explorer les relations entre les rendements des cultures (céréales, maïs et soya) (Figure 29) et les indicateurs de santé, les pratiques culturales et les variables climatiques. Les modèles ont permis d'expliquer en moyenne 36,8 % de la variance du rendement standardisé des cultures en validation croisée. En raison du petit nombre d'observations (120) avec des mesures de rendement, les modèles itérés étaient relativement instables, mais ont néanmoins permis de dégager des tendances intéressantes. Ainsi, la stabilité des agrégats 2-4 mm mesurée en août, la respiration du sol (test Solvita) mesurée en août et la MVA mesurée en mai étaient les meilleurs indicateurs (autres que les pratiques culturales et les variables climatiques) pour expliquer le rendement de cultures (Figure 30).

Les graphiques de dépendance partielle présentés à l'annexe 3 (Figures 31 à 46) permettent d'illustrer l'effet marginal de chacune des variables sur le rendement prédit des cultures. Ces graphiques permettent notamment d'observer si la variation de la valeur de l'indicateur tend à faire augmenter ou diminuer le rendement prédit des cultures. Ainsi, les dépendances partielles ont montré qu'avec une stabilité des agrégats 2-4 mm mesurée en août supérieure à 75 %, le rendement du maïs était environ 0,5 t/ha plus élevé et d'environ 0,2 t/ha plus élevé pour le soya et les céréales (Figure 46). Avec une respiration du sol (test Solvita) en août supérieure à 24 mg C-CO₂ kg⁻¹, le rendement était environ 0,4 t/ha plus élevé pour le maïs, environ 0,2 t/ha plus élevé pour le soya et environ 0,1 t/ha plus élevé pour les céréales (Figure 40). Avec une MVA en mai inférieure à 1.5, le rendement était environ 0,2 t/ha plus faible pour le maïs et le soya et environ 0,1 t/ha plus faible pour les céréales (Figure 41). Autrement dit, le rendement des cultures sur le dispositif semble avoir été maximisé avec une stabilité des agrégats 2-4 mm en août supérieure à 75 %, un test Solvita en août supérieur à 24 mg C-CO₂ kg⁻¹ et une MVA en mai inférieure à 1.5 g cm⁻³. Soit selon deux indicateurs physiques et un indicateur biologique parmi les six indicateurs étudiés. Le rendement a été plus particulièrement influencé par le travail du sol, les séquences (précédents culturaux, période du travail de sol) et l'application de fumier dans les itinéraires.

Conclusion

Bien qu'il soit difficile d'étudier l'effet des itinéraires agronomiques sur une si courte période, l'étude permet de bien documenter l'évolution des propriétés de sol durant les premières années du dispositif. À court terme, les itinéraires étudiés causent une diminution de la teneur en matière organique du sol de surface et tendent à réduire la stabilité des agrégats. Ces itinéraires font augmenter le carbone labile (POxC) et tendent à augmenter la respiration du sol (Solvita). Le rendement est principalement influencé par le travail du sol, les facteurs intra-séquence (comme le précédent cultural ou la période du travail du sol) et l'apport de fumier de poulet. Soulignons que des tendances constatées durant les premières années de l'implantation d'un dispositif de longue durée peuvent être inversées après plusieurs années, une fois que le dispositif nouvellement implanté est entré dans une période de plus grande stabilité. Les effets des traitements sont alors souvent plus facilement distinguables par rapport aux changements causés par l'implantation de nouveaux itinéraires agronomiques en mode biologique sur un site en mode conventionnel depuis de nombreuses années. C'est notamment une des raisons pour laquelle il est important de maintenir en place de tels dispositifs pendant de longues périodes de temps.

DIFFUSION DES RÉSULTATS

Des résultats préliminaires du projet ont été présentés dans le cadre d'une communication orale au colloque Bio pour tous! le 17 février 2021 à Victoriaville dont le titre est *Dispositif longue durée en grandes cultures bio à l'INAB : premiers résultats*. Le diaporama est disponible sur le site du CETAB+ (<https://cetab.bio/evenements/colloque-2021>).

Estimer le nombre d'entreprises touchées par les résultats du projet	12 500
--	--------

Selon le Portrait diagnostique de l'industrie des grains au Québec (2020), 12 500 exploitations agricoles déclarent une superficie de grains alors que parmi celles-ci 625 sont en mode biologique selon le portail Bio Québec (2024). Toutes ces entreprises sont directement concernées par les résultats de ce projet. Soulignons que l'ensemble des entreprises agricoles en production végétale en sol sont concernées par ce projet.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

Ce projet a permis d'obtenir des données probantes pour plusieurs indicateurs associés à la santé et conservation des sols, soit 3840 mesures. Les résultats indiquent qu'il n'y a pas d'indicateur idéal, mais qu'une combinaison d'indicateurs est requise, incluant les rendements des cultures, pour évaluer l'effet d'itinéraire agronomiques sur la santé des sols. L'utilisation de l'apprentissage automatique, une forme d'intelligence artificielle axée sur le développement d'algorithmes statistiques capables de détecter des relations complexes, s'avère une avenue prometteuse pour diagnostiquer la productivité d'agrosystèmes végétaux à l'aide d'un ensemble d'indicateurs et pour établir les changements et les pratiques agricoles à mettre en place afin d'obtenir des performances optimales et durables au bénéfice de l'ensemble de la société.

PERSONNES-RESSOURCES POUR INFORMATION

Gilles Gagné, gagne.gilles@icloud.com
Michaël Leblanc, micblanc@hotmail.com
Julie Anne Wilkinson, wilkinson.julianne@cegepvicto.ca

REMERCIEMENTS

Nous remercions les personnes suivantes du CETAB+ pour leur contribution au projet : Caroline Beaulieu, Alexandre Beaupré, Sabrina Bergeron, Rachel Dionne, Mathieu Picard-Flibotte, Charlotte Giard-Laliberté, Jean-Baptiste Milesi, Jorge Monorris, Claudia Thibodeau, Manon Verville et Julie Anne Wilkinson ainsi que de nombreux stagiaires-étudiants collégiaux et universitaires. Nous remercions également Denis Angers et Léon-Étienne Parent pour leurs conseils concernant les méthodologies et les appareils de mesure.

ANNEXE 1 : Séquences, itinéraires et dispositif expérimental

Itinéraire	Séquence	An 1 - 2019							An 2 - 2020				
		Printemps			Été-Automne				Printemps			Été-Automne	
		Travail primaire de sol	Fumier	Culture (+ EV)	EV post-récolte	Culture	Fumier	Travail primaire de sol	Travail primaire de sol	Fumier	Culture (+ EV)	EV Post-récolte	Travail primaire de sol
T01	1	Labour	Oui	Orge avec EV	Pois fourrager	Non	Non	Aucun	Labour	Oui	Maïs avec EV	NA	Aucun
T02	1	Rotoculteur	Oui	Orge avec EV	Pois fourrager	Non	Non	Aucun	Chisel	Oui	Maïs avec EV	NA	Aucun
T03	1	Rotoculteur	Non	Orge avec EV	Pois fourrager	Non	Non	Aucun	Chisel	Non	Maïs avec EV	NA	Aucun
T04	2	Rotoculteur	Non	Soya	NA	Non	Non	Chisel	Non	Oui	Blé prin. avec EV	Avoine en CC	Chisel
T05	2	Rotoculteur	Non	Soya	NA	Non	Non	Chisel	Non	Non	Blé prin. avec EV	Avoine en CC	Chisel
T06	2	Rotoculteur	Non	Soya	NA	Non	Non	Scalpeur	Non	Oui	Blé prin. avec EV	Avoine en CC	Scalpeur
T07	3	Labour	Oui	Maïs avec EV	NA	Non	Non	Labour	Non	Non	Soya	NA	Labour
T08	3	Rotoculteur	Oui	Maïs avec EV	NA	Non	Non	Chisel	Non	Non	Soya	NA	Chisel
T09	3	Rotoculteur	Non	Maïs avec EV	NA	Non	Non	Chisel	Non	Non	Soya	NA	Déchaumeuse
T10	4	Labour	Oui	Orge brassicole avec EV	Non	Blé aut.	Oui (post-levé)	Labour	Non	Non	Blé aut. avec EV	Pois fourrager	Labour
T11	4	Rotoculteur	Oui	Orge brassicole avec EV	Non	Blé aut.	Oui (post-levé)	Chisel	Non	Non	Blé aut. avec EV	Pois fourrager	Chisel
T12	4	Rotoculteur	Non	Orge brassicole avec EV	Non	Blé aut.	Non	Scalpeur	Non	Non	Blé aut. avec EV	Pois fourrager	Scalpeur
T13 (SDCV)	5	Rotoculteur	Oui	Trèfle blanc (Huia)	NA	NA	Non	NA	Scalpeur	Non	Soya en SDCV sur trèfle blanc	Non	Scalpeur
T14	6	Rotoculteur	Oui	Prairie permanente	NA	NA	Non	NA	Non	Non	Prairie permanente	NA	NA
T15	7	Rotoculteur	Non	Sol nu en permanence	NA	NA	NA	NA	Non	Non	Sol nu en permanence	NA	NA

NA : Non applicable CC: Culture de couverture SDCV : Semis direct sous couvert végétal EV : Engrais vert

Note 1 : L'engrais vert (EV) dans Orge ou Blé est du trèfle rouge deux coupes implanté au semis (dans le sillon avec la semence de la céréale)

Note 2 : L'engrais de ferme utilisé est du fumier de poulets à griller

Note 3 : Le fumier a été incorporé avec un vibroculteur (2019) ou une déchaumeuse (2020 à 2022) moins de 24 heures après l'application

Figure 1 : Les itinéraires agronomiques du dispositif de longue durée de 2019 à 2022.

Itinéraire	Séquence	An 3 - 2021				An 4 - 2022				
		Printemps			Été-Automne	Printemps			Été-Automne	
		Travail primaire de sol	Fumier	Culture (+ EV)	Travail primaire de sol	Travail primaire du sol	Fumier	Culture + EV	EV Post-récolte	Travail du sol
T01	1	Labour	Non	Soya	Aucun	Labour	Oui	Blé prin. avec EV	Pois fourrager	Aucun
T02	1	Chisel	Non	Soya	Aucun	Chisel	Oui	Blé prin.avec EV	Pois fourrager	Aucun
T03	1	Chisel	Non	Soya	Aucun	Chisel	Non	Blé prin. avec EV	Pois fourrager	Aucun
T04	2	Non	Non	Soya	Chisel	Non	Non	Soya	NA	Chisel
T05	2	Non	Non	Soya	Chisel	Non	Non	Soya	NA	Chisel
T06	2	Non	Non	Soya	Scalpeur-déchaumeuse	Non	Non	Soya	NA	Scalpeur
T07	3	Non	Oui	Implantation Prairie avec orge en plante abri	Aucun	NA	Non	Prairie	NA	NA
T08	3	Non	Oui	Implantation Prairie avec orge en plante abri	Aucun	NA	Non	Prairie	NA	NA
T09	3	Non	Non	Implantation Prairie avec orge en plante abri	Aucun	NA	Non	Prairie	NA	NA
T10	4	Non	Oui	Maïs avec EV	Labour	Non	NA	Soya	NA	Chisel
T11	4	Non	Oui	Maïs avec EV	Chisel	Non	NA	Soya	NA	Chisel
T12	4	Non	Non	Maïs avec EV	Déchaumeuse	Non	NA	Soya	NA	Scalpeur
T13 (SDCV)	5	Scalpeur	Non	Soya en SDCV sur trèfle blanc	NA	Scalpeur	Oui	Blé prin. avec EV	Pois fourrager	NA
T14	6	Non	Non	Prairie permanente	NA	Non	NA	Prairie permanente	NA	NA
T15	7	NA	NA	Sol nu en permanence	NA	NA	NA	Sol nu en permanence	NA	NA

NA : Non applicable CC: Culture de couverture SDCV : Semis direct sous couvert végétal EV : Engrais vert

Note : L'engrais vert (EV) dans Orge ou Blé est du trèfle rouge deux coupes implanté au semis (dans le sillon avec la semence de la céréale)
Note : L'engrais de ferme utilisé est du fumier de poulets à griller
Note : Le fumier a été incorporé avec un vibroculteur (2019) ou une déchaumeuse (2020 à 2022) moins de 24 heures après l'application

Figure 1 : Les itinéraires agronomiques du dispositif de longue durée de 2019 à 2022 (suite).



Figure 2 : Le dispositif expérimental du dispositif de longue durée avec la disposition des traitements sur chacun des quatre blocs (les traitements d'une même séquence ont la même couleur).

ANNEXE 2 : Analyse des données par indicateur

Matière organique (%)

Tableau 1 : Analyses de variance de la teneur en matière organique.

Année	Facteurs à effets fixes	ddl num.	ddl dénum.	valeur-F	valeur-p
2019	Traitement	14	42	1.166	0.3351
2020	Traitement	14	42	0.735	0.7276
2022	Traitement	14	42	0.903	0.5619
Toutes les années	Date	2	90	92.630	0.0000
	Traitement	14	42	0.888	0.5765
	Date x Traitement	28	90	1.194	0.2614

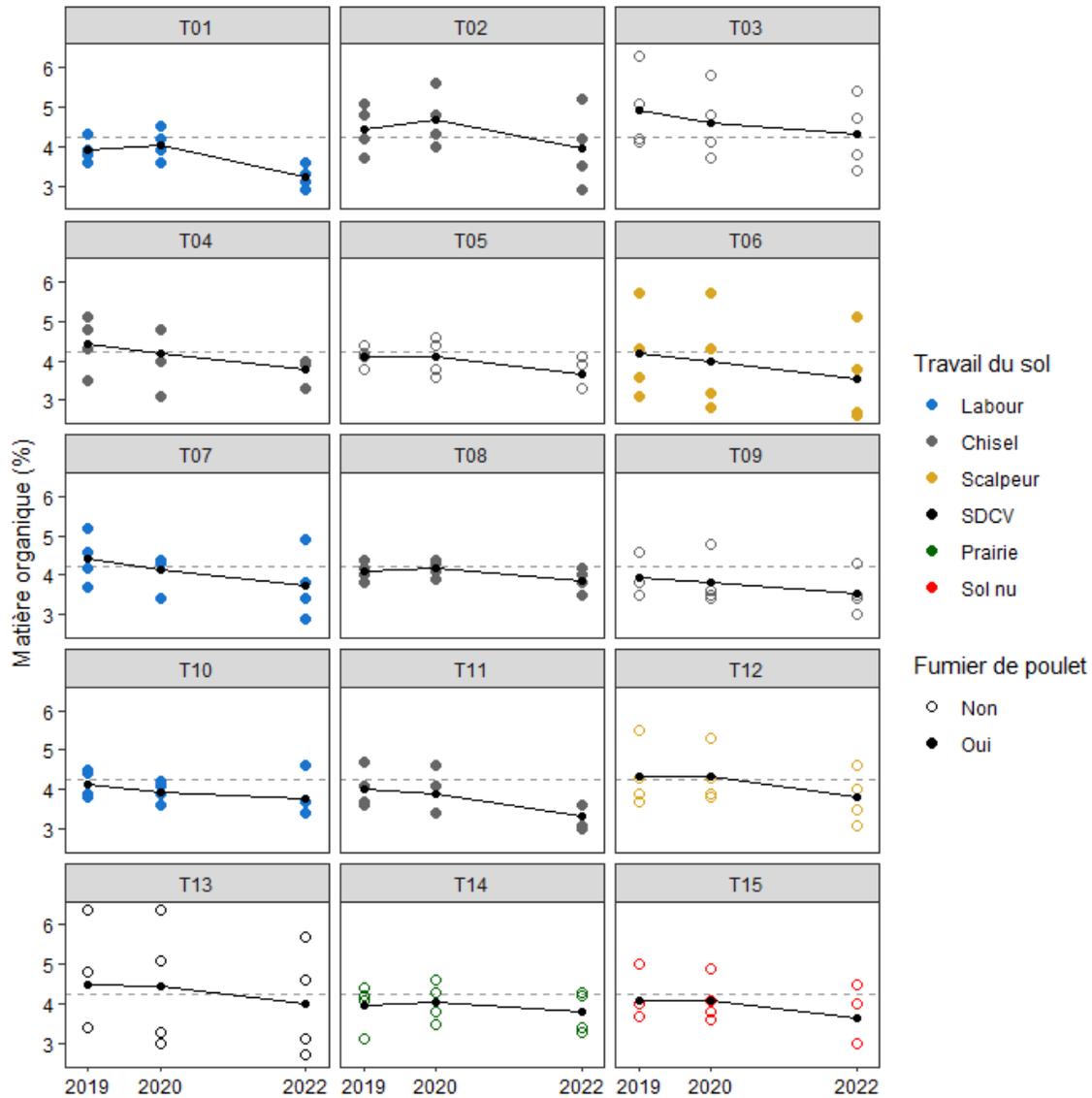


Figure 3 : Évolution de la matière organique par traitement. Le point noir représente la moyenne des observations par date d'échantillonnage et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps zéro du dispositif longue durée (mai 2019).

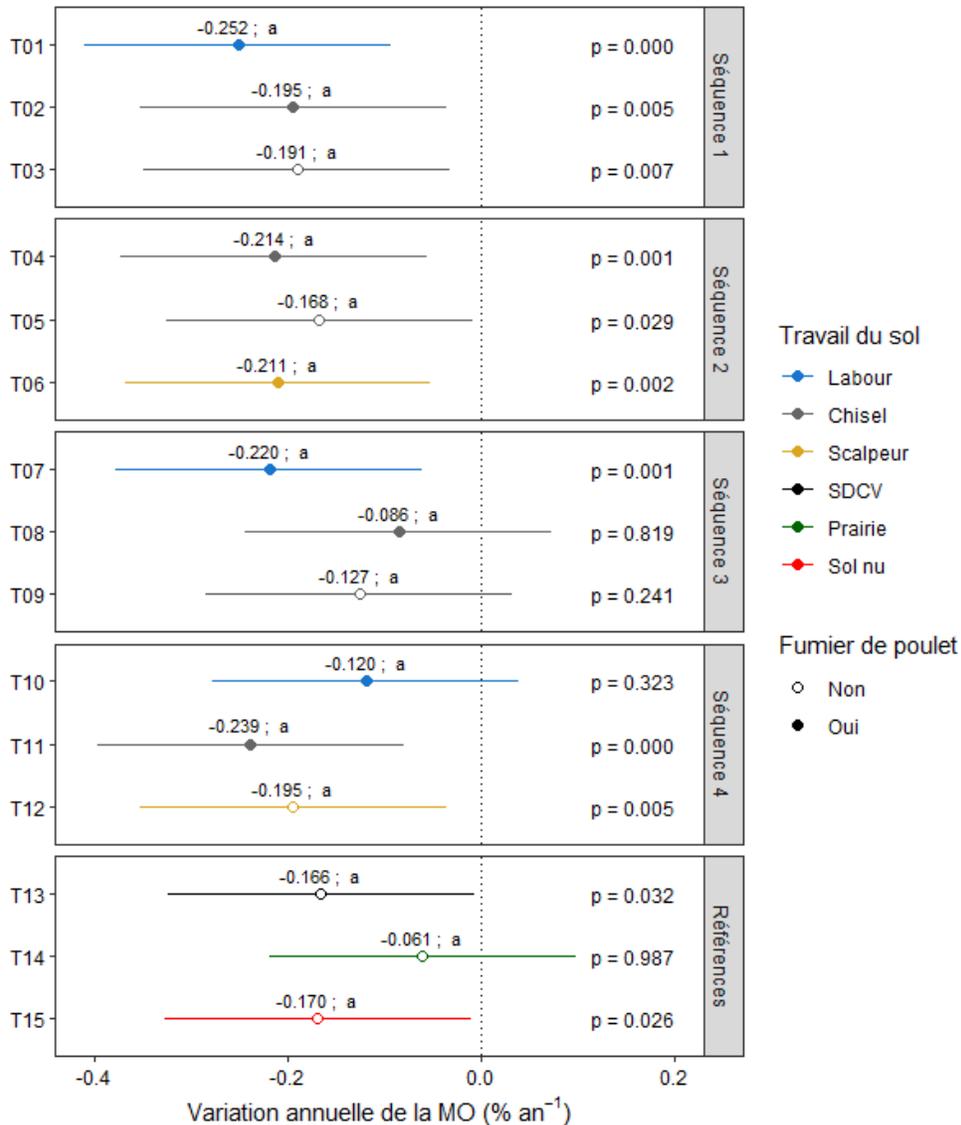


Figure 4 : Coefficient de régression de la relation linéaire entre le contenu en matière organique (MO) et les années (2019 à 2022) par traitement. Le point représente l'estimation du coefficient (pente), les lettres regroupent les pentes qui ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %, la ligne horizontale représente l'intervalle de confiance à 95 % de la pente et la valeur-p la probabilité que la pente ne soit pas différente de zéro.

Tableau 2 : Quantités (Qté) moyennes de matière organique (MO) et différences (Diff.) de 0 à 20 cm par traitement calculées selon le % de MO et la masse volumique apparente (MVA) en mai 2020 et en mai 2022 en tonne à l'hectare

Séquence	Code-Traitement	Type - Travail du sol	Moment - Travail du sol	Traitement avec fumier ?	Qté MO sur 20 cm (t/ha) 2020	Qté MO sur 20 cm (t/ha) 2022	Diff. 2022 - 2020 (t/ha)	Diff. 2022 2022 (% t/ha)
1	T01	Labour	Printemps	Oui	124,8	100,3	-24,5	-19,7
1	T02	Chisel	Printemps	Oui	144,5	123,7	-20,8	-14,4
1	T03	Chisel	Printemps	Non	137,0	128,8	-8,2	-6,0
2	T04	Chisel	Automne	Oui	113,3	99,7	-13,6	-12,0
2	T05	Chisel	Automne	Non	124,8	96,7	-28,2	-22,6
2	T06	Scalpeur	Automne	Oui	128,3	99,1	-29,2	-22,8
3	T07	Labour	Automne	Oui	104,8	109,4	4,7	4,4
3	T08	Chisel	Automne	Oui	106,3	114,8	8,5	8,0
3	T09	Chisel	Automne	Non	107,7	110,5	2,8	2,6
4	T10	Labour	Automne	Oui	119,7	105,6	-14,2	-11,8
4	T11	Chisel	Automne	Oui	116,9	88,6	-28,3	-24,2
4	T12	Scalpeur	Automne	Non	134,2	108,3	-25,9	-19,3
5	T13	SDCV	Print/Aut	Oui	135,3	123,4	-11,9	-8,8
6	T14	Prairie Perm.	NA	Non	130,1	117,4	-12,7	-9,7
7	T15	Sol nu	NA	Non	121,2	105,8	-15,3	-12,7

Carbone labile au permanganate (POxC)

Tableau 3 : Analyses de variance du carbone labile au permanganate.

Année	Facteur à effets fixes	ddl num.	ddl dénum.	valeur-F	valeur-p
2020	Date	4	180	28.535	0.000
	Traitement	14	42	0.512	0.913
	Date x Traitement	56	180	0.827	0.795
2021	Date	4	180	10.548	0.000
	Traitement	14	42	1.208	0.306
	Date x Traitement	56	180	1.220	0.166
2022	Date	1	45	0.004	0.949
	Traitement	14	42	0.678	0.782
	Date x Traitement	14	45	0.562	0.880
Toutes les années	Date	11	495	28.478	0.000
	Traitement	14	42	0.780	0.684
	Date x Traitement	154	495	1.196	0.079

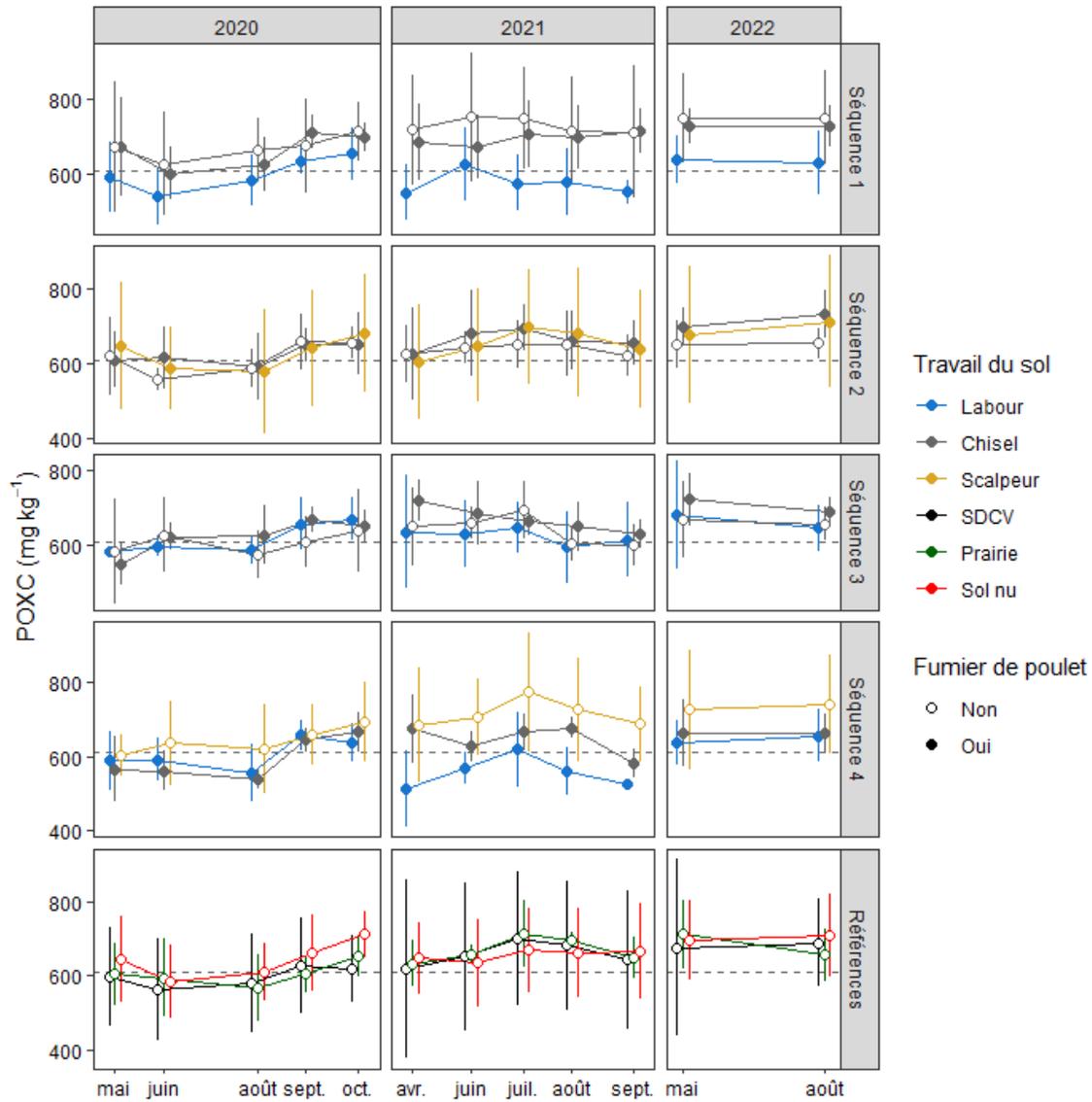


Figure 5 : Évolution du carbone labile au permanganate (POxC) par traitement. Le point représente la moyenne par date d'échantillonnage, la ligne verticale son écart-type et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

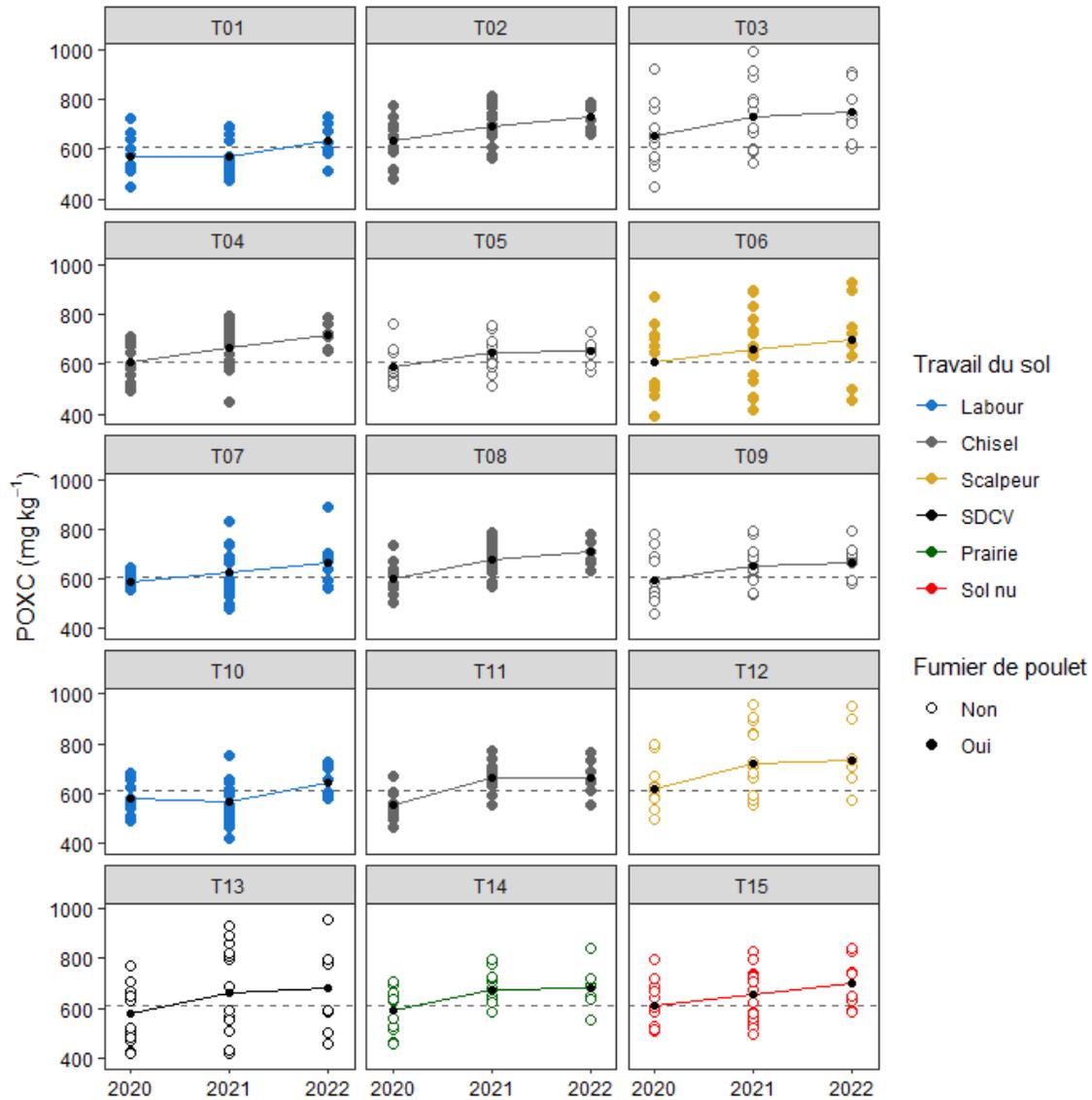


Figure 6 : Évolution annuelle du carbone labile au permanganate (POxC) par traitement. Seules les observations de mai et août sont présentées afin de comparer les années sur des périodes communes. Le point noir représente la moyenne des observations par année et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

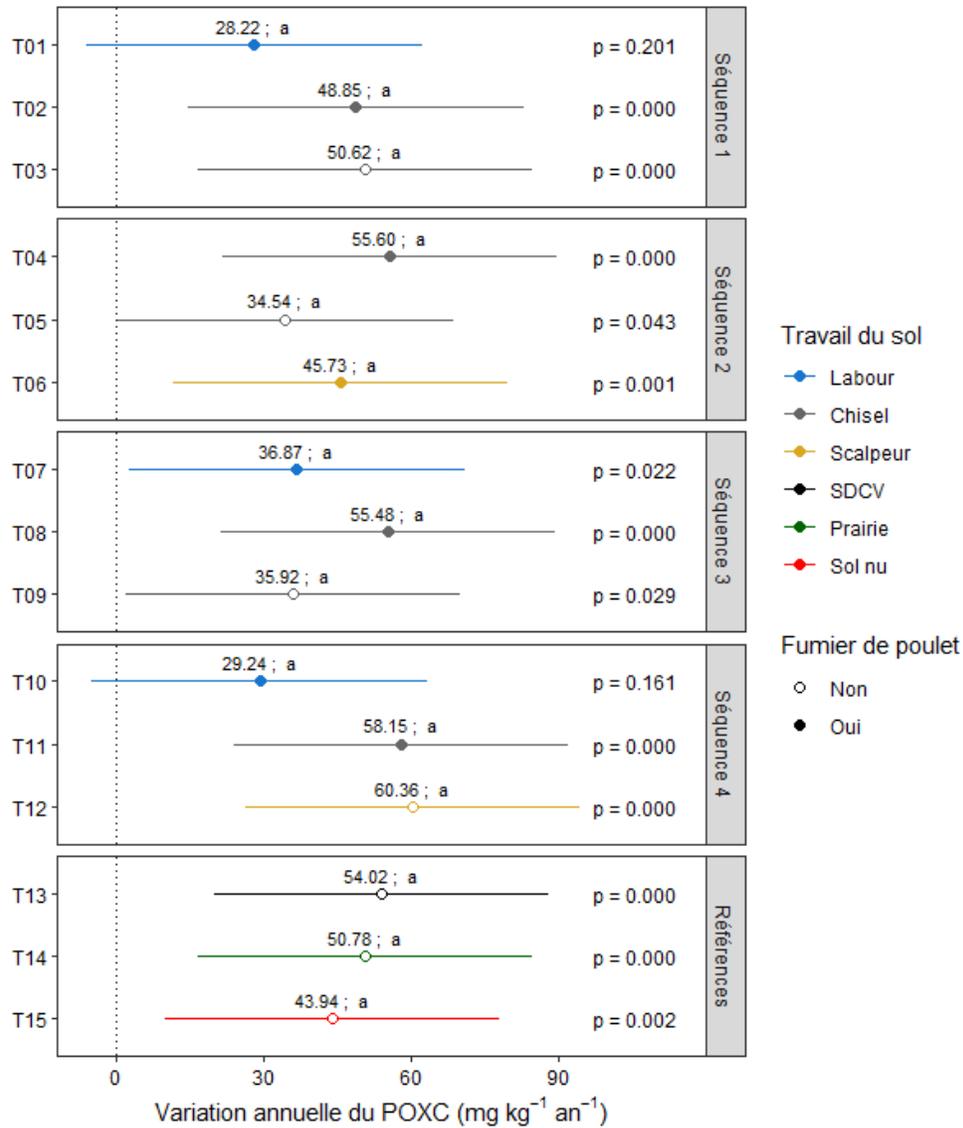


Figure 7 : Coefficient de régression de la relation linéaire entre le carbone labile au permanganate (POxC) et les années (2020 à 2022). Le point représente l'estimation du coefficient (pente), les lettres regroupent les pentes qui ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %, la ligne horizontale représente l'intervalle de confiance à 95 % de la pente et la valeur-p la probabilité que la pente ne soit pas différente de zéro.

B.3 Respiration du sol (test Solvita)

Tableau 4 : Analyses de variance du test Solvita.

Année	Facteur à effets fixes	ddl num.	ddl dénum.	valeur-F	valeur-p
2020	Date	4	169.3	67.540	0.000
	Traitement	14	41.5	7.065	0.000
	Date x Traitement	56	169.7	1.759	0.003
2021	Date	4	176.9	39.929	0.000
	Traitement	14	42.1	2.268	0.021
	Date x Traitement	56	176.6	2.384	0.000
2022	Date	1	43.8	172.002	0.000
	Traitement	14	41.3	3.065	0.003
	Date x Traitement	14	43.6	1.592	0.120
Toutes les années	Date	11	476.1	70.793	0.000
	Traitement	14	45.0	4.737	0.000
	Date x Traitement	154	475.9	1.960	0.000

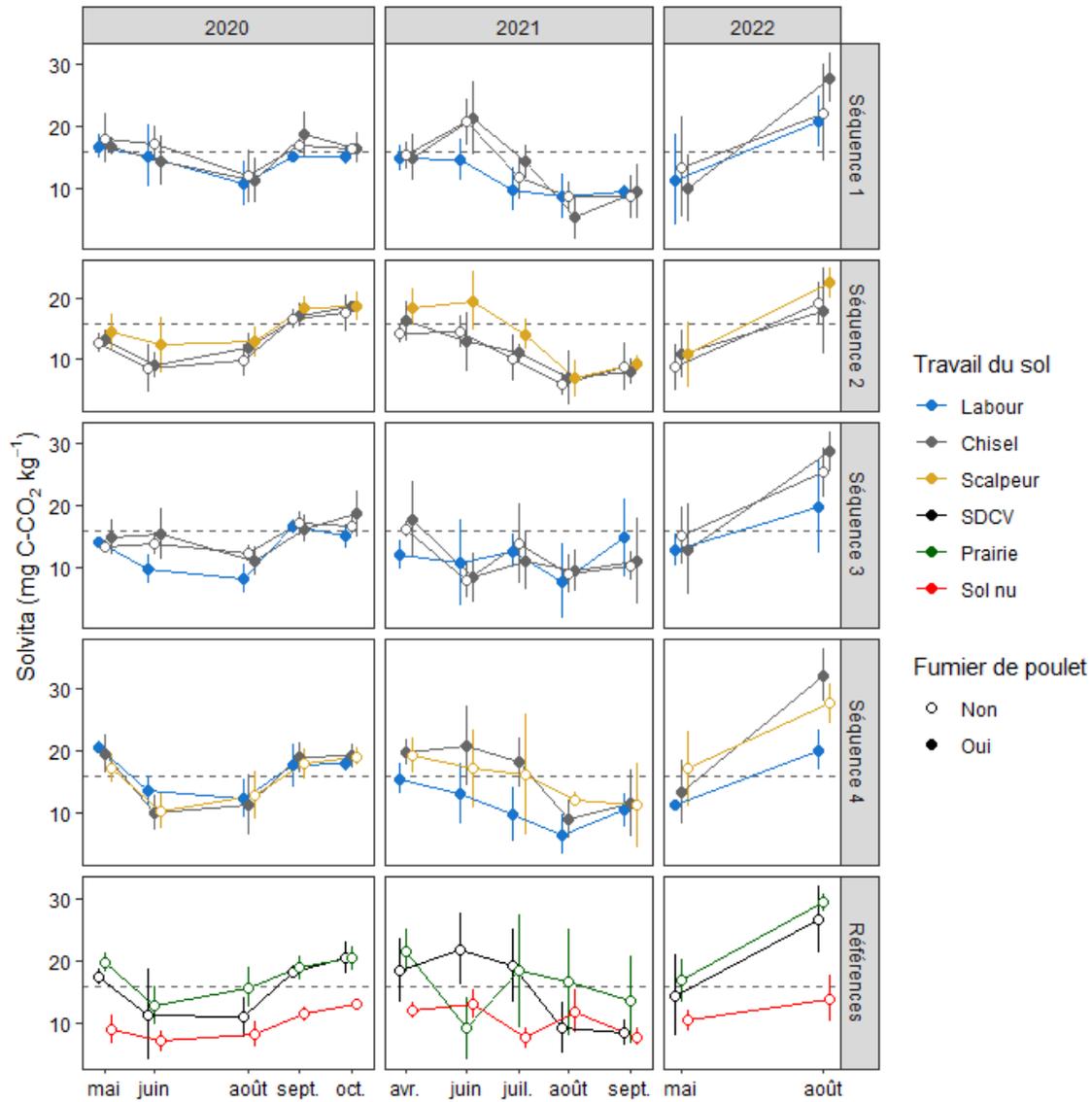


Figure 8 : Évolution de la respiration du sol (test Solvita) par traitement. Le point représente la moyenne par date d'échantillonnage, la ligne verticale son écart-type et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

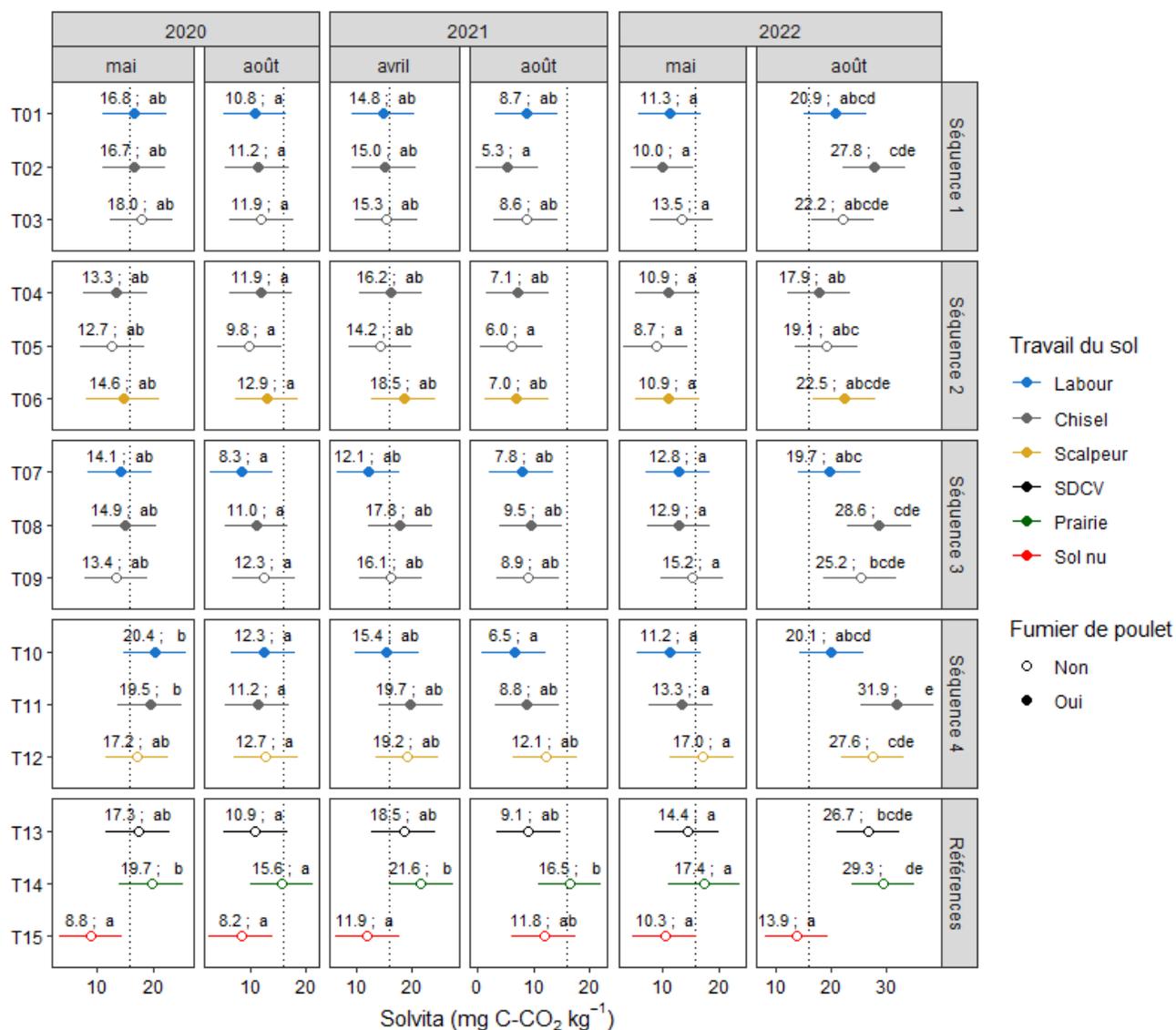


Figure 9 : Respiration du sol (test Solvita) en début de saison et à la mi-août. Le point représente la moyenne par traitement, la ligne horizontale son intervalle de confiance à 95 %, les lettres regroupent les moyennes qui ne sont pas significativement différents au seuil de 5 % et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

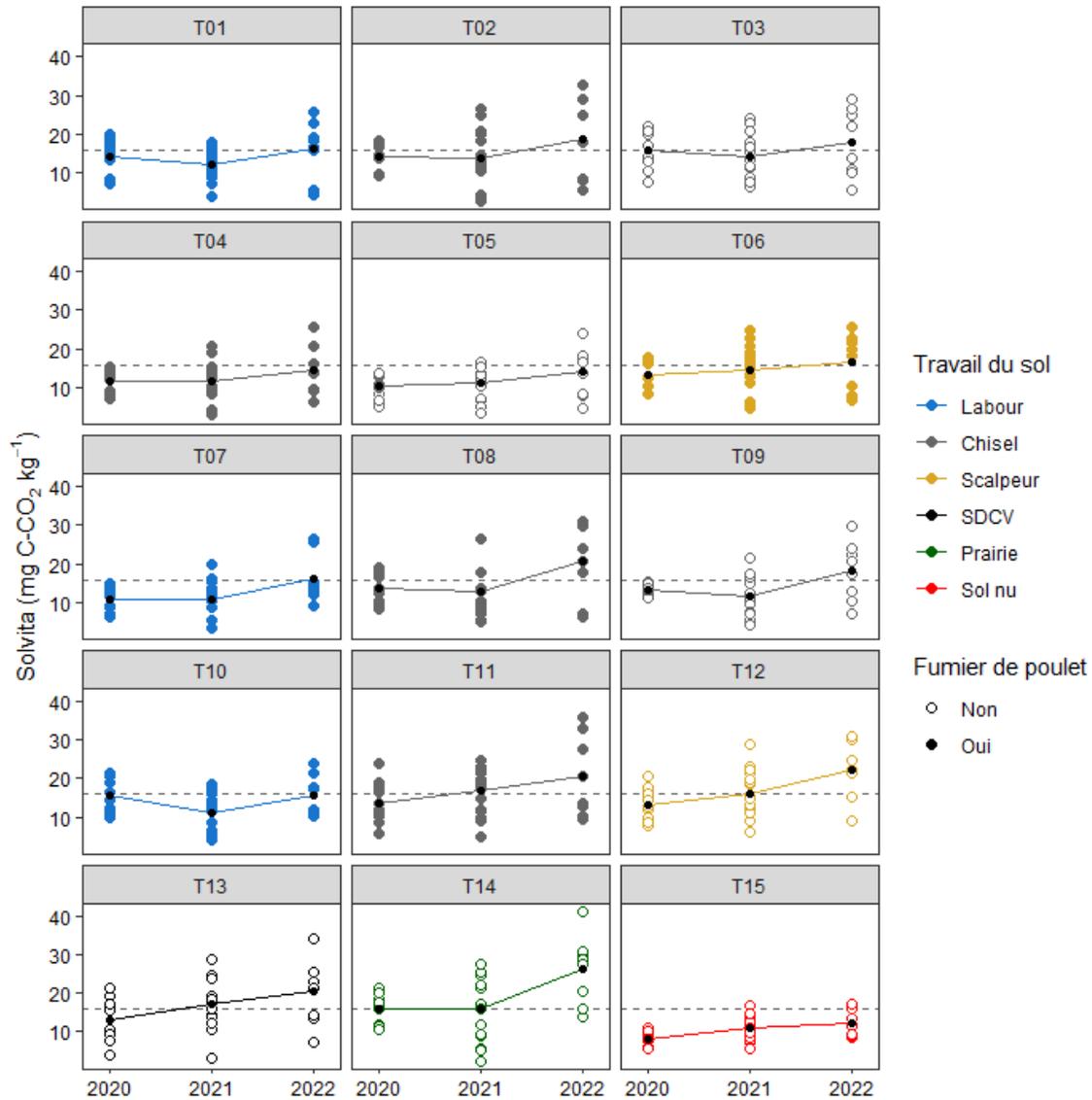


Figure 10 : Évolution annuelle de la respiration du sol (test Solvita) par traitement. Seules les observations de mai et août sont présentées afin de comparer les années sur des périodes communes. Le point noir représente la moyenne des observations par année et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

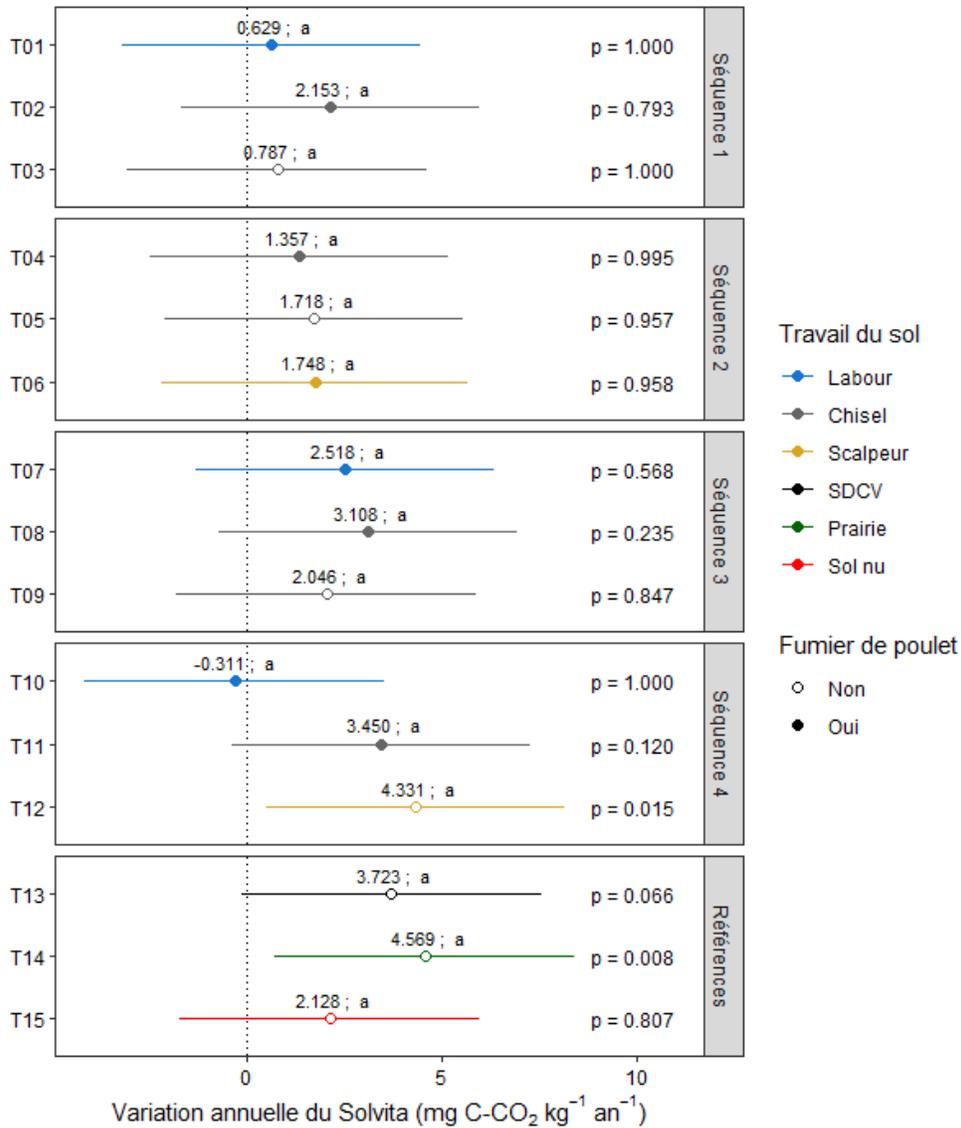


Figure 11 : Coefficient de régression de la relation linéaire entre la respiration du sol (test Solvita) et les années (2020 à 2022). Le point représente l'estimation du coefficient (pente), les lettres regroupent les pentes qui ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %, la ligne horizontale représente l'intervalle de confiance à 95 % de la pente et la valeur-p la probabilité que la pente ne soit pas différente de zéro.

B.4 Masse volumique apparente

Tableau 5 : Analyses de variance de la masse volumique apparente.

Année	Source de variation	ddl num.	ddl dénum.	valeur-F	valeur-p
2020	Date	4	180	12.537	0.000
	Traitement	14	42	9.087	0.000
	Date x Traitement	56	180	3.250	0.000
2021	Date	4	180	8.432	0.000
	Traitement	14	42	4.079	0.000
	Date x Traitement	56	180	2.251	0.000
2022	Date	1	45	16.475	0.000
	Traitement	14	42	3.221	0.002
	Date x Traitement	14	45	1.287	0.253
Toutes les années	Date	11	495	10.294	0.000
	Traitement	14	42	5.185	0.000
	Date x Traitement	154	495	3.045	0.000

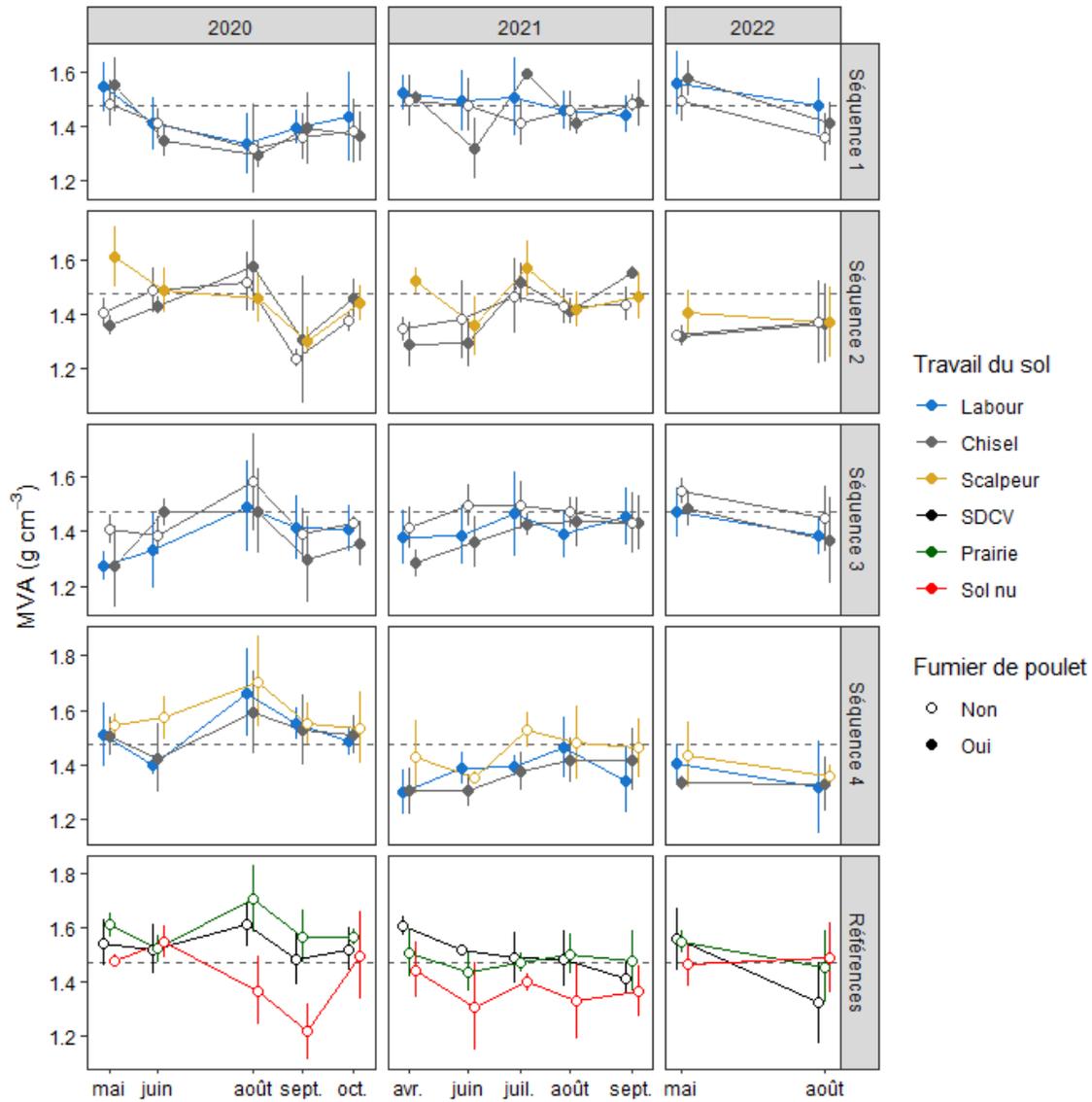


Figure 12 : Évolution de la masse volumique apparente (MVA) par traitement. Le point représente la moyenne par date d'échantillonnage, la ligne verticale son écart-type et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

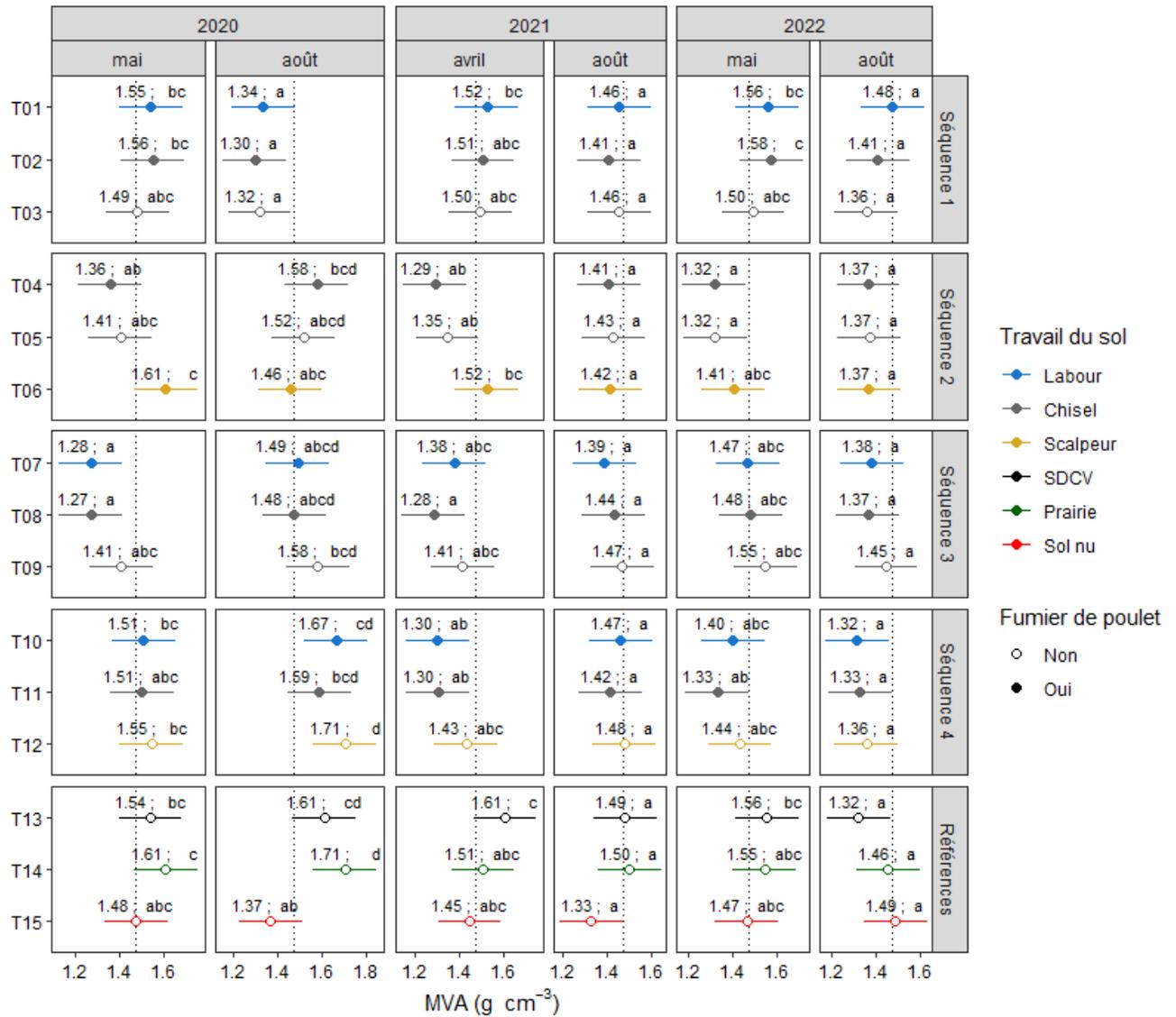


Figure 13 : Masse volumique apparente (MVA) en début de saison et à la mi-août. Le point représente la moyenne par traitement, la ligne horizontale son intervalle de confiance à 95 %, les lettres regroupent les moyennes qui ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

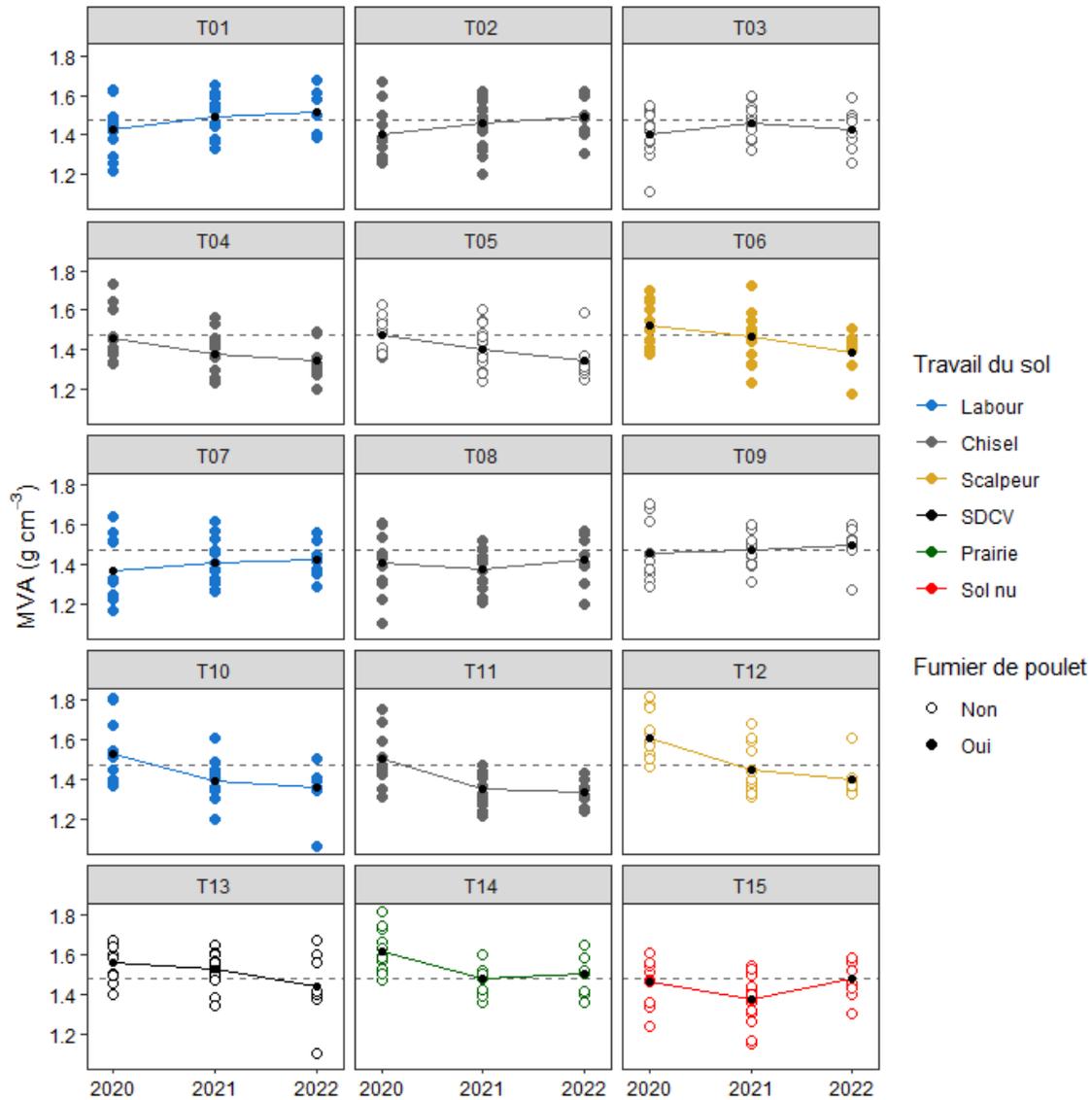


Figure 14 : Évolution annuelle de la masse volumique apparente (MVA) par traitement. Seules les observations de mai et août sont présentées afin de comparer les années sur des périodes communes. Le point noir représente la moyenne des observations par année et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

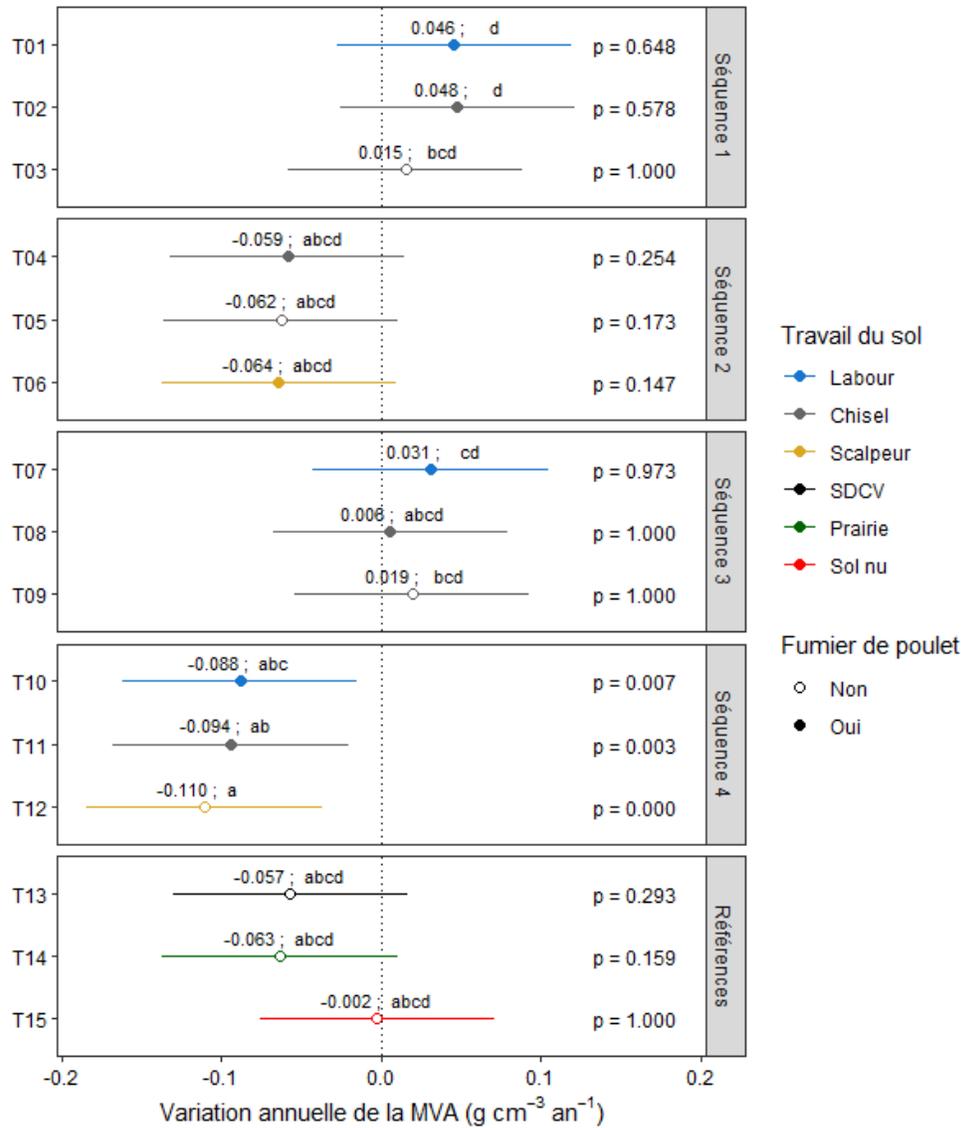


Figure 15 : Coefficient de régression de la relation linéaire entre la masse volumique apparente (MVA) et les années (2020 à 2022). Le point représente l'estimation du coefficient (pente), les lettres regroupent les pentes qui ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %, la ligne horizontale représente l'intervalle de confiance à 95 % de la pente et la valeur-p la probabilité que la pente ne soit pas différente de zéro.

B.5 Proportion d'agrégats > 2 mm

Tableau 6 : Analyses de variance de la proportion d'agrégats > 2 mm.

Année	Source de variation	ddl num.	ddl dénum.	valeur-F	valeur-p
2020	Date	4	180	22.232	0.000
	Traitement	14	42	2.532	0.010
	Date x Traitement	56	180	2.467	0.000
2021	Date	4	180	26.758	0.000
	Traitement	14	42	4.017	0.000
	Date x Traitement	56	180	1.647	0.008
2022	Date	1	45	1.096	0.301
	Traitement	14	42	2.352	0.016
	Date x Traitement	14	45	1.235	0.285
Toutes les années	Date	11	495	23.452	0.000
	Traitement	14	42	2.676	0.007
	Date x Traitement	154	495	2.211	0.000

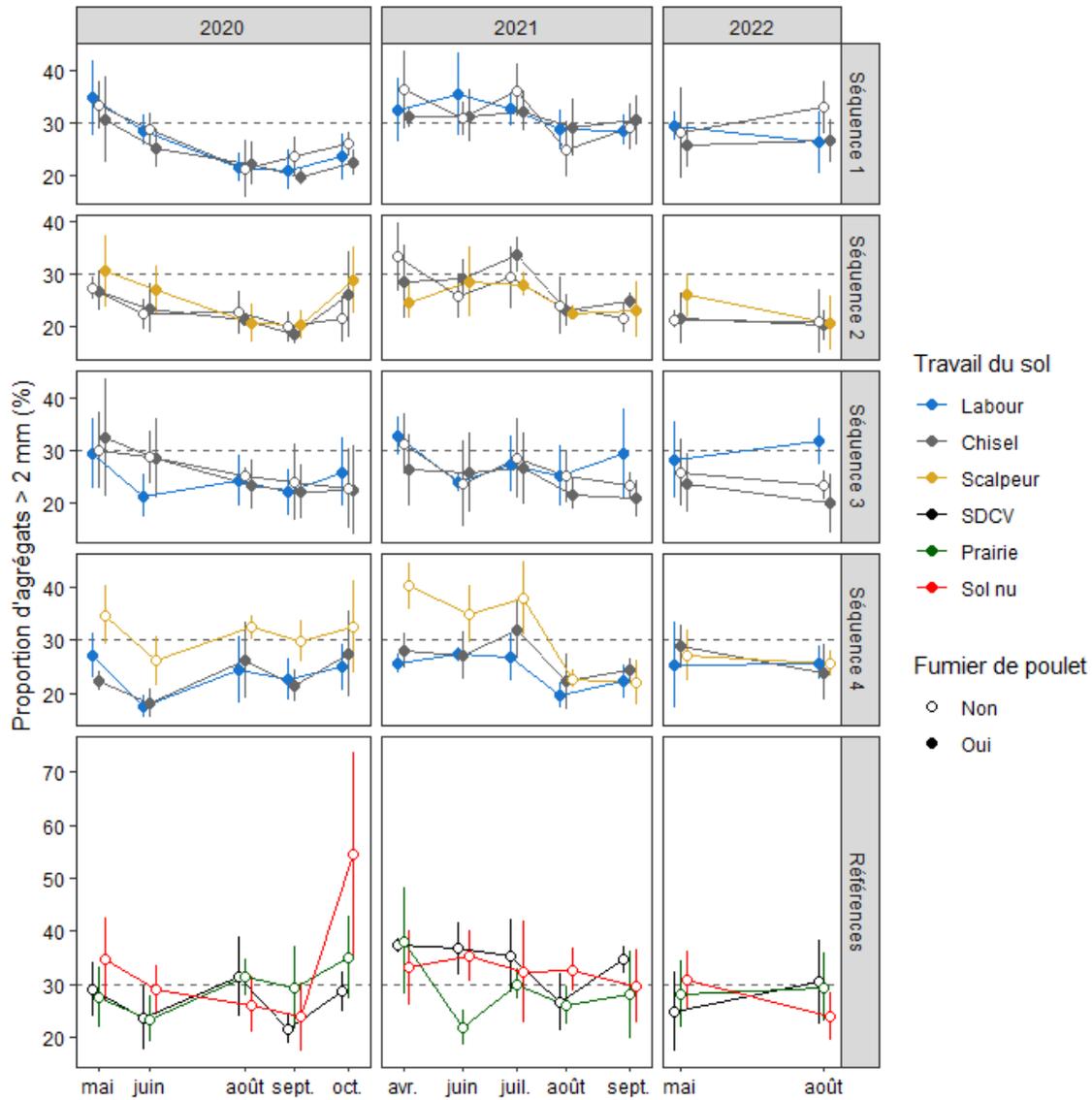


Figure 16 : Évolution de la proportion d'agrégats > 2 mm par traitement. Le point représente la moyenne par date d'échantillonnage, la ligne verticale son écart-type et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

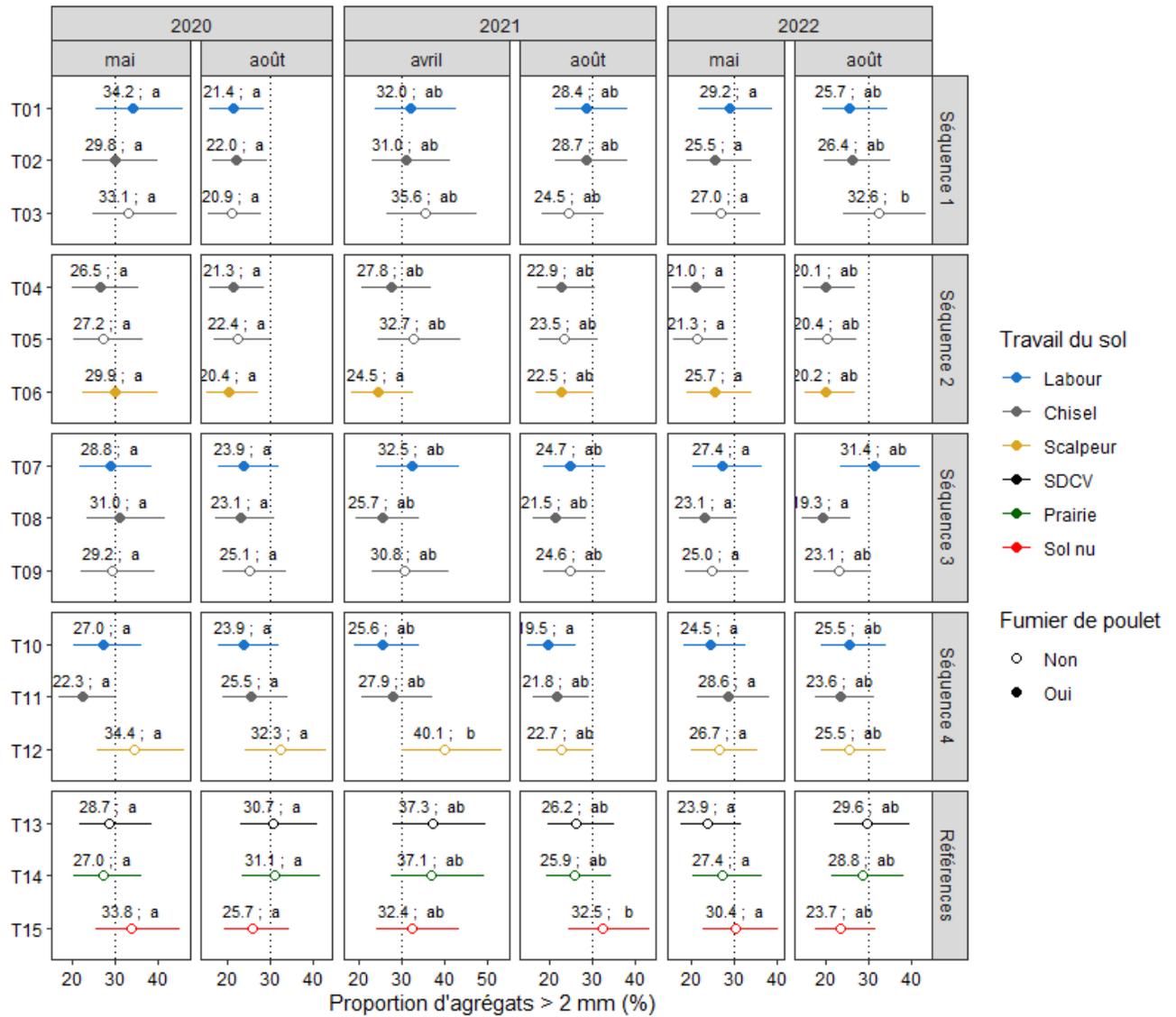


Figure 17 : Proportion d'agrégats > 2 mm en début de saison et à la mi-août. Le point représente la moyenne par traitement, la ligne horizontale son intervalle de confiance à 95 %, les lettres regroupent les moyennes qui ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

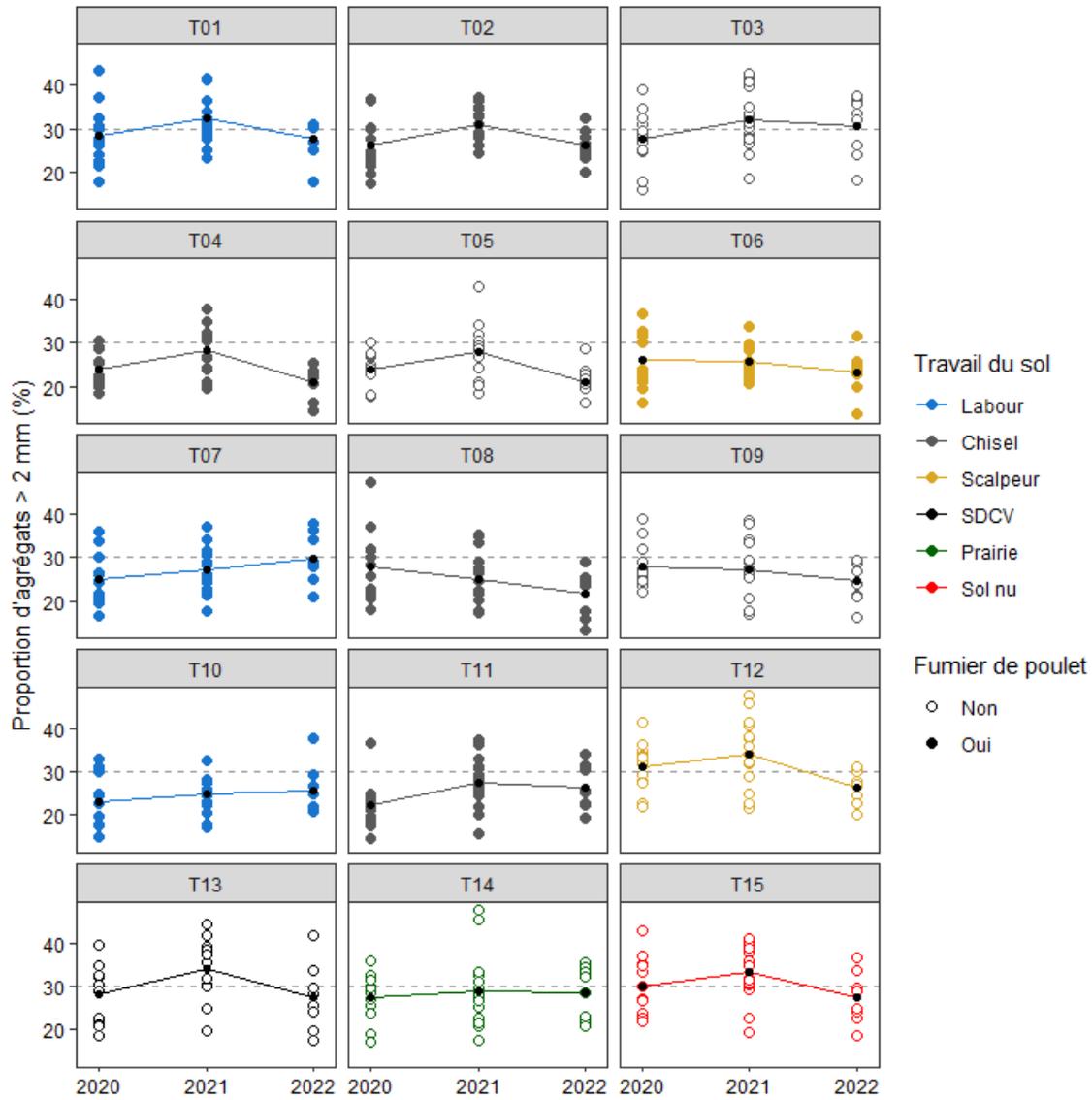


Figure 18 : Évolution annuelle de la proportion d'agrégats > 2 mm par traitement. Seules les observations de mai et août sont présentées afin de comparer les années sur des périodes communes. Le point noir représente la moyenne des observations par année et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

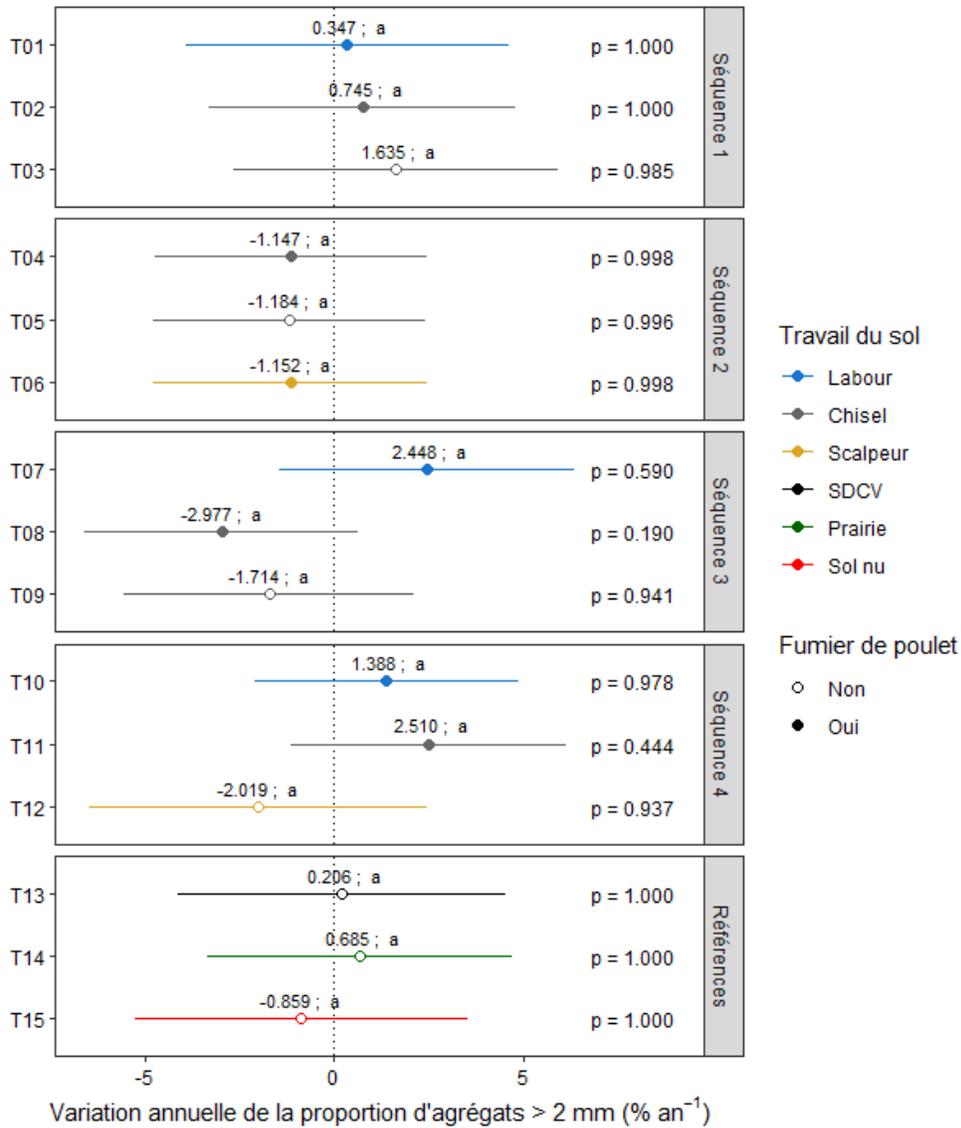


Figure 19 : Coefficient de régression de la relation linéaire entre la proportion d'agrégats > 2 mm et les années (2020 à 2022). Le point représente l'estimation du coefficient (pente), les lettres regroupent les pentes qui ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %, la ligne horizontale représente l'intervalle de confiance à 95 % de la pente et la valeur-p la probabilité que la pente ne soit pas différente de zéro.

Stabilité des agrégats 1-2 mm

Tableau 7 : Analyses de variance de la stabilité des agrégats 1-2 mm.

Année	Facteur à effets fixes	ddl num.	ddl dénum.	valeur-F	valeur-p
2020	Date	4	179.1	20.698	0.000
	Traitement	14	42.0	2.965	0.003
	Date x Traitement	56	179.1	1.730	0.004
2021	Traitement	14	42	1.786	0.074
2022	Traitement	14	42	1.974	0.045
Toutes les années	Date	6	269.1	54.097	0.000
	Traitement	14	42.0	3.109	0.002
	Date x Traitement	84	269.1	1.261	0.086

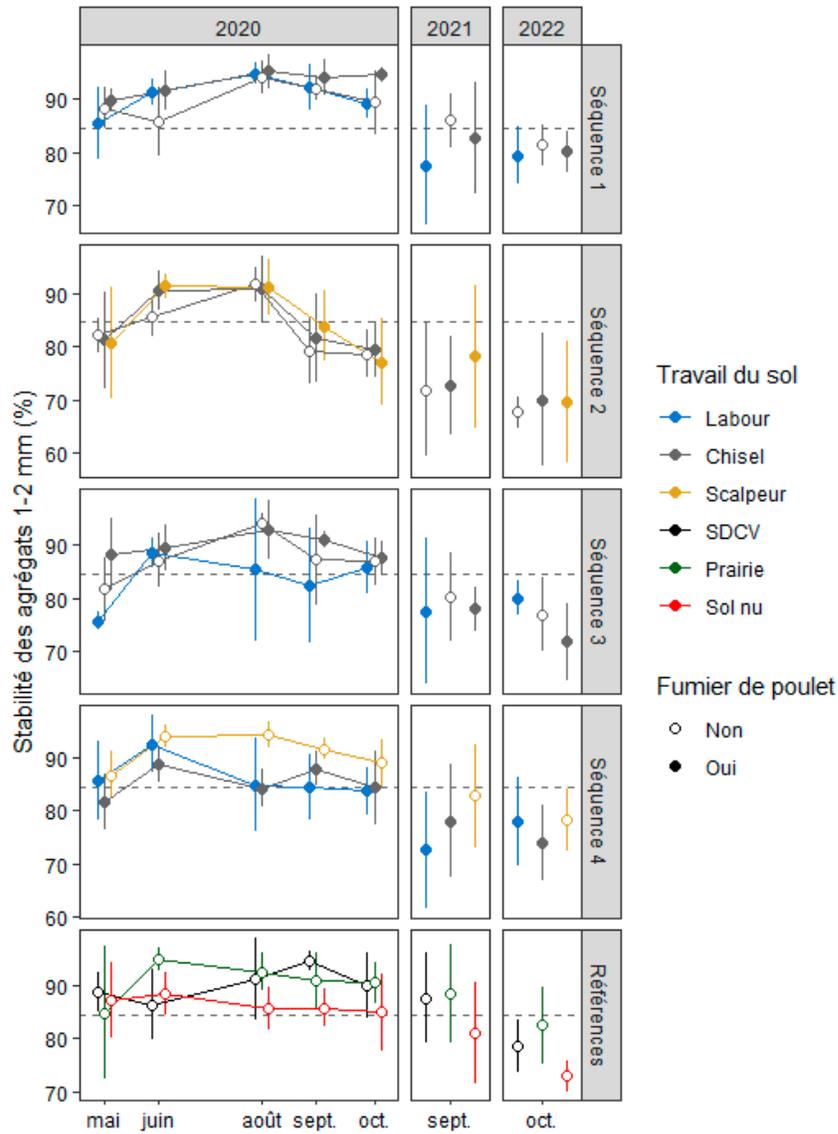


Figure 20 : Évolution de la stabilité des agrégats 1-2 mm par traitement. Le point représente la moyenne par date d'échantillonnage, la ligne verticale son écart-type et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

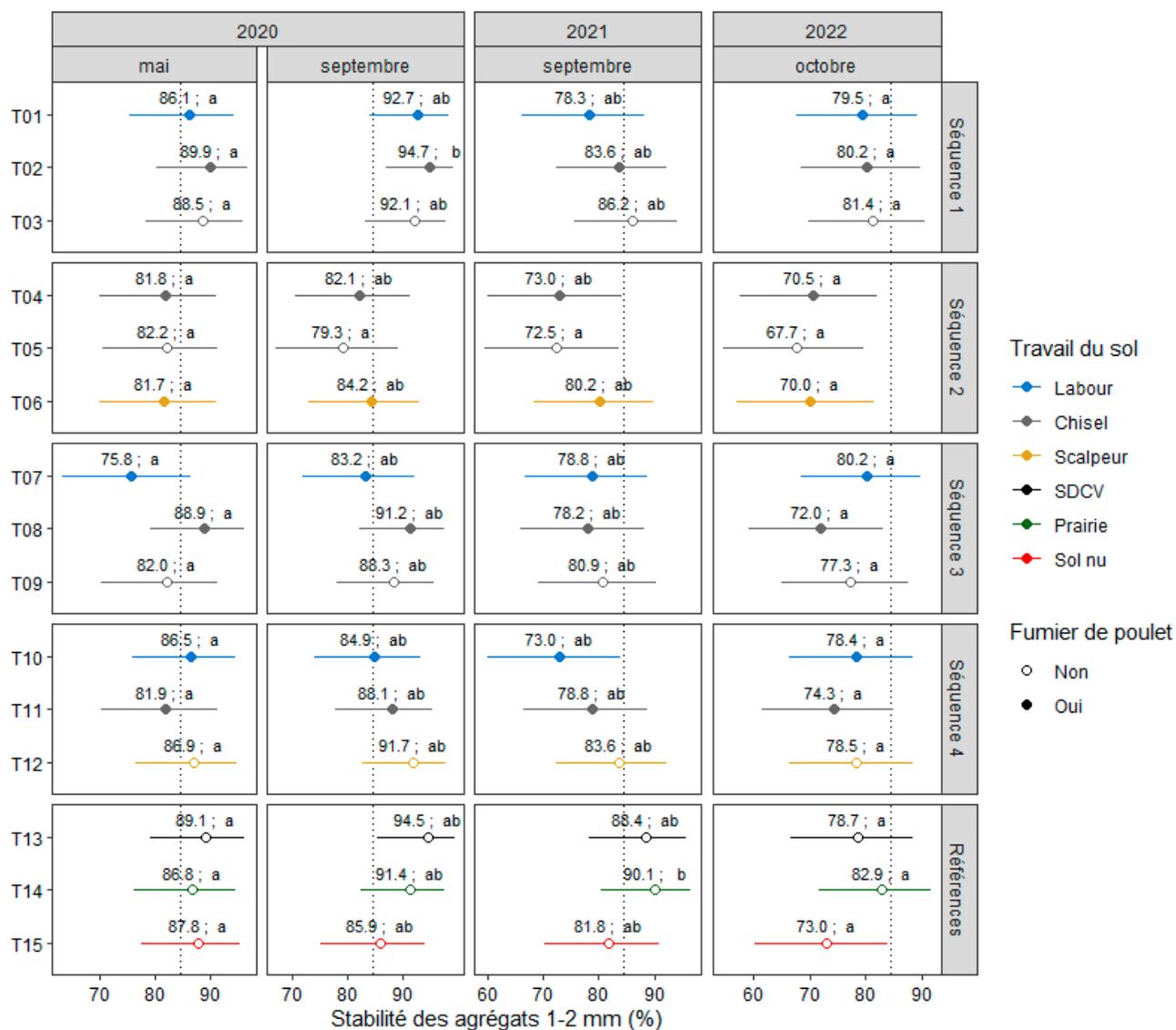


Figure 21 : Stabilité des agrégats 1-2 mm au début du projet (mai 2020) et en septembre ou octobre de chaque année. Le point représente la moyenne par traitement, la ligne horizontale son intervalle de confiance à 95 %, les lettres regroupent les moyennes qui ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

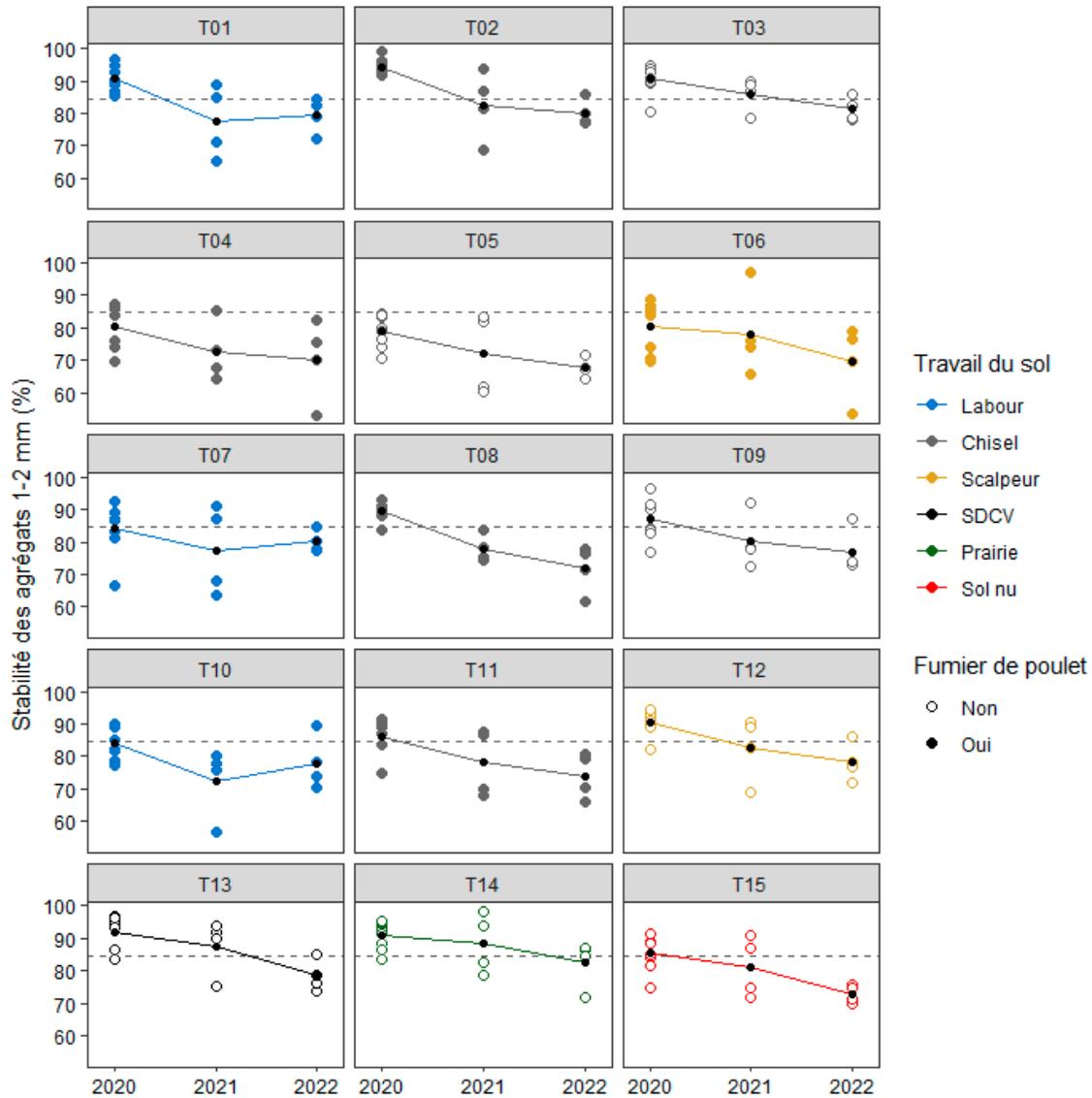


Figure 22 : Évolution annuelle de la stabilité des agrégats 1-2 mm par traitement. Seules les observations de septembre à octobre sont présentées afin de comparer les années sur des périodes communes. Le point noir représente la moyenne des observations par année et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

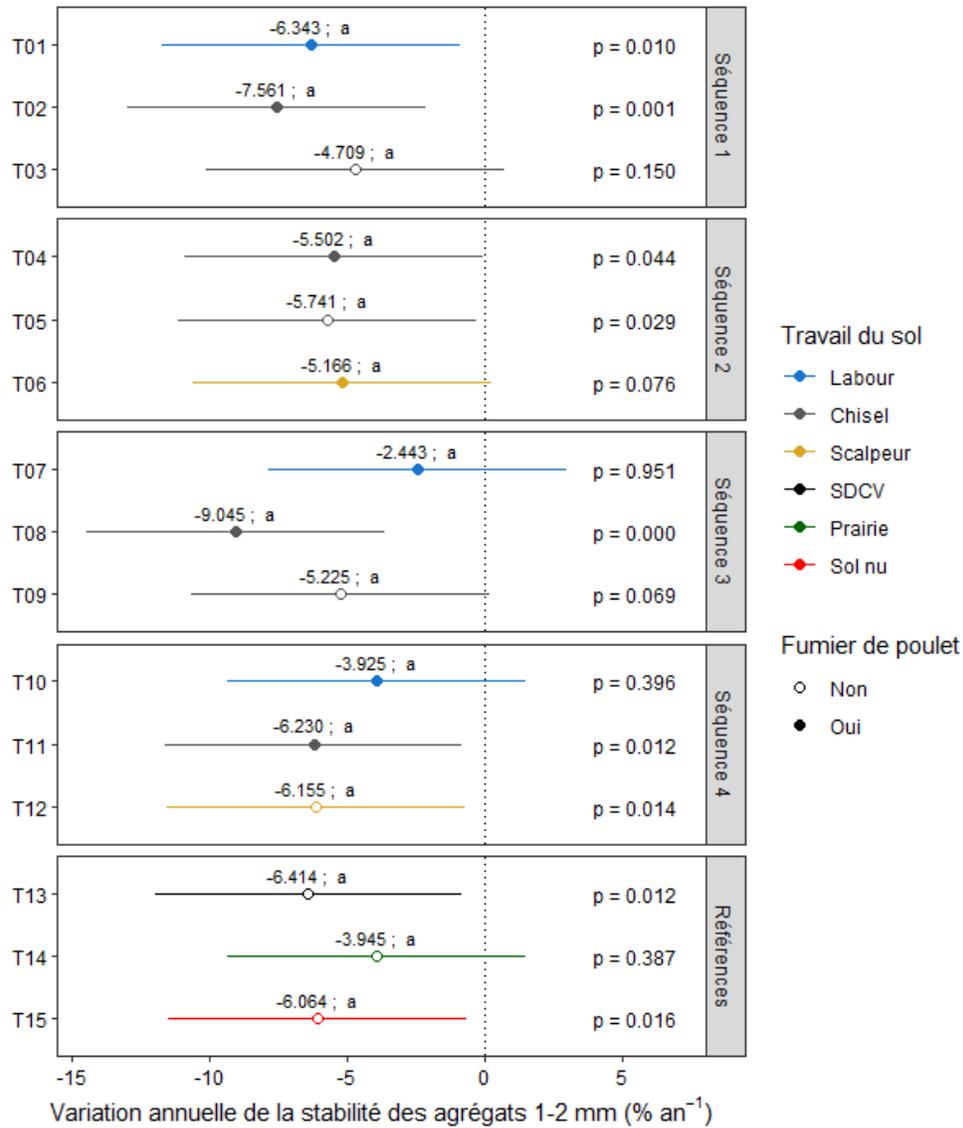


Figure 23 : Coefficient de régression de la relation linéaire entre de la stabilité des agrégats 1-2 mm et les années (2020 à 2022). Le point représente l'estimation du coefficient (pente), les lettres regroupent les pentes qui ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %, la ligne horizontale représente l'intervalle de confiance à 95 % de la pente et la valeur-p la probabilité que la pente ne soit pas différente de zéro.

Stabilité des agrégats 2-4 mm

Tableau 8 : Analyses de variance de la stabilité des agrégats 2-4 mm.

Année	Facteur à effets fixes	ddl num.	ddl dénum.	valeur-F	valeur-p
2020	Date	4	180.0	47.339	0.000
	Traitement	14	42.0	4.942	0.000
	Date x Traitement	56	180.0	1.815	0.002
2021	Traitement	14	42	5.680	0.000
2022	Traitement	14	42	1.943	0.049
Toutes les années	Date	6	270.0	57.484	0.000
	Traitement	14	42.0	5.761	0.000
	Date x Traitement	84	270.0	1.828	0.000

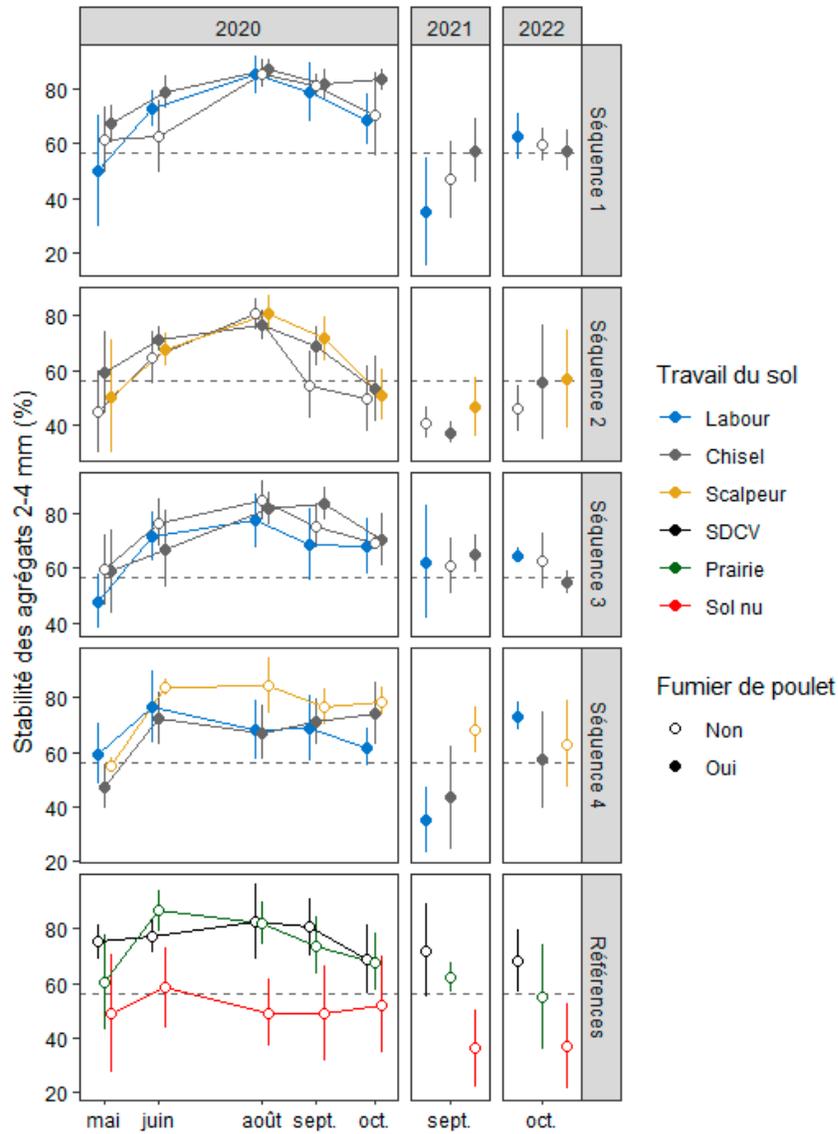


Figure 24 : Évolution de la stabilité des agrégats 2-4 mm par traitement en 2022, en septembre 2021 et en octobre 2022. Le point représente la moyenne par date d'échantillonnage, la ligne verticale son écart-type et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

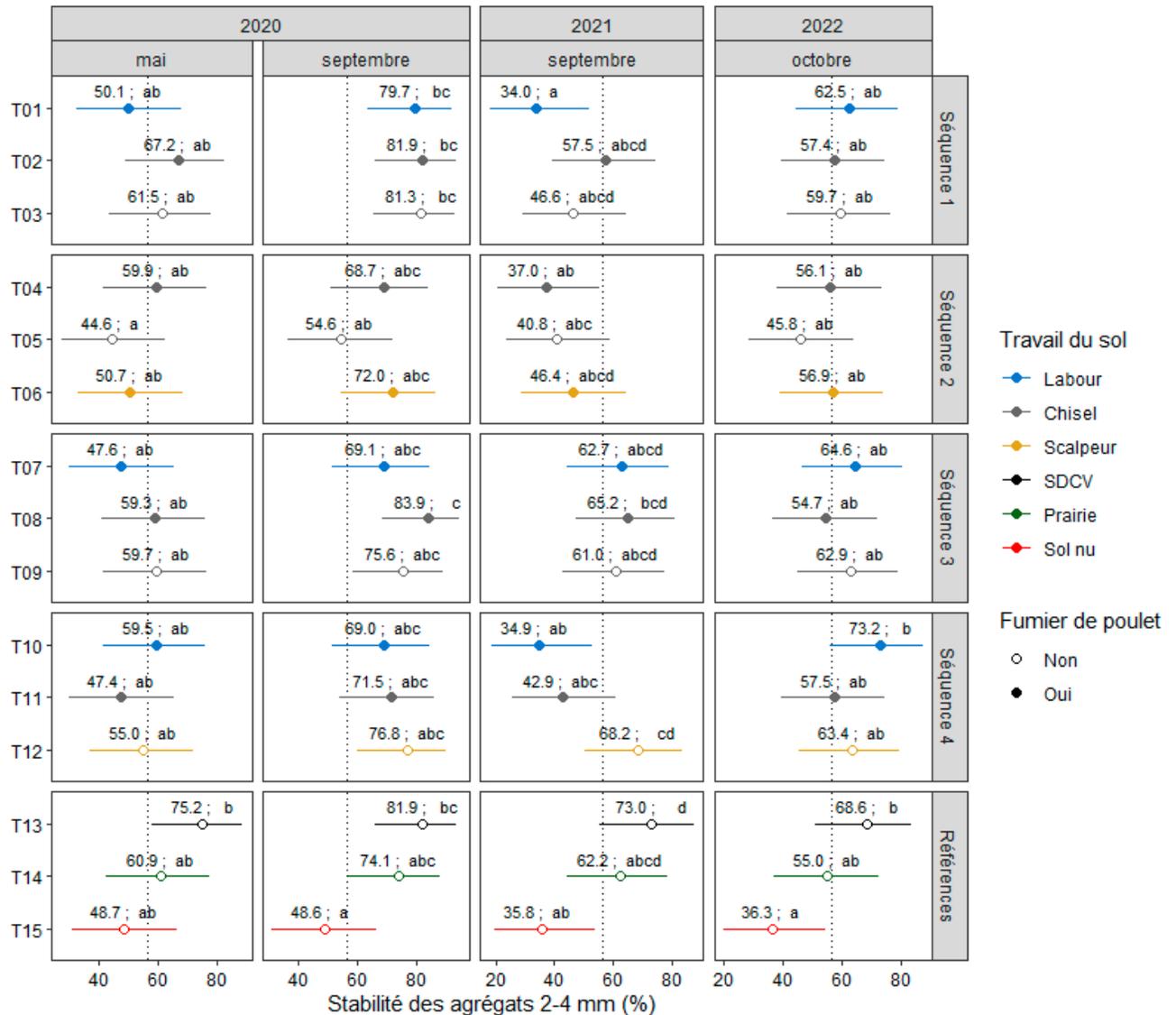


Figure 25 : Stabilité des agrégats 2-4 mm au début du projet (mai 2020) et en septembre ou octobre de chaque année. Le point représente la moyenne par traitement, la ligne horizontale son intervalle de confiance à 95 %, les lettres regroupent les moyennes qui ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

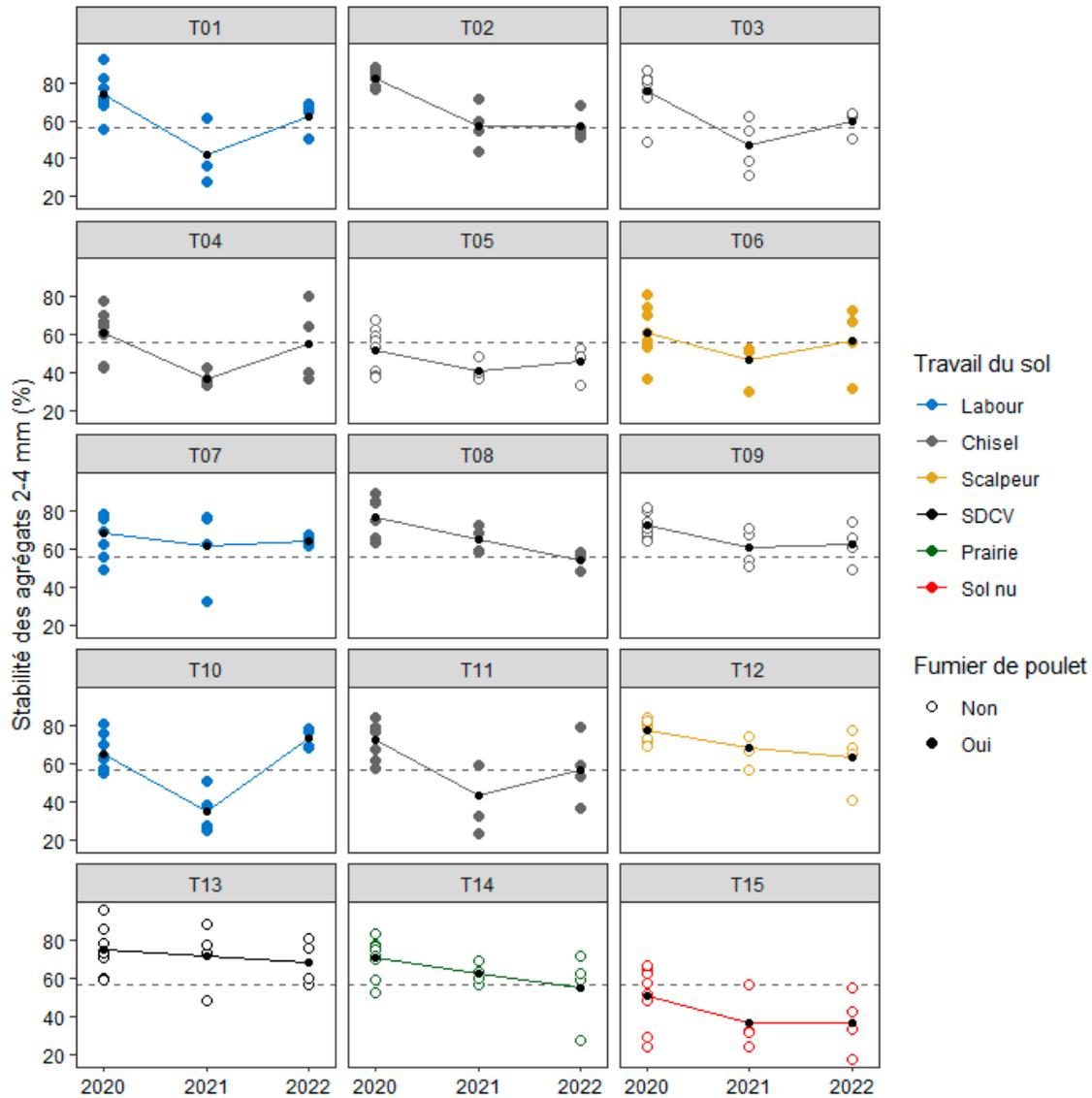


Figure 26 : Évolution annuelle de la stabilité des agrégats 2-4 mm par traitement. Seules les observations de septembre à octobre sont présentées afin de comparer les années sur des périodes communes. Le point noir représente la moyenne des observations par année et la ligne pointillée la moyenne générale de tous les traitements au temps initial (mai 2020).

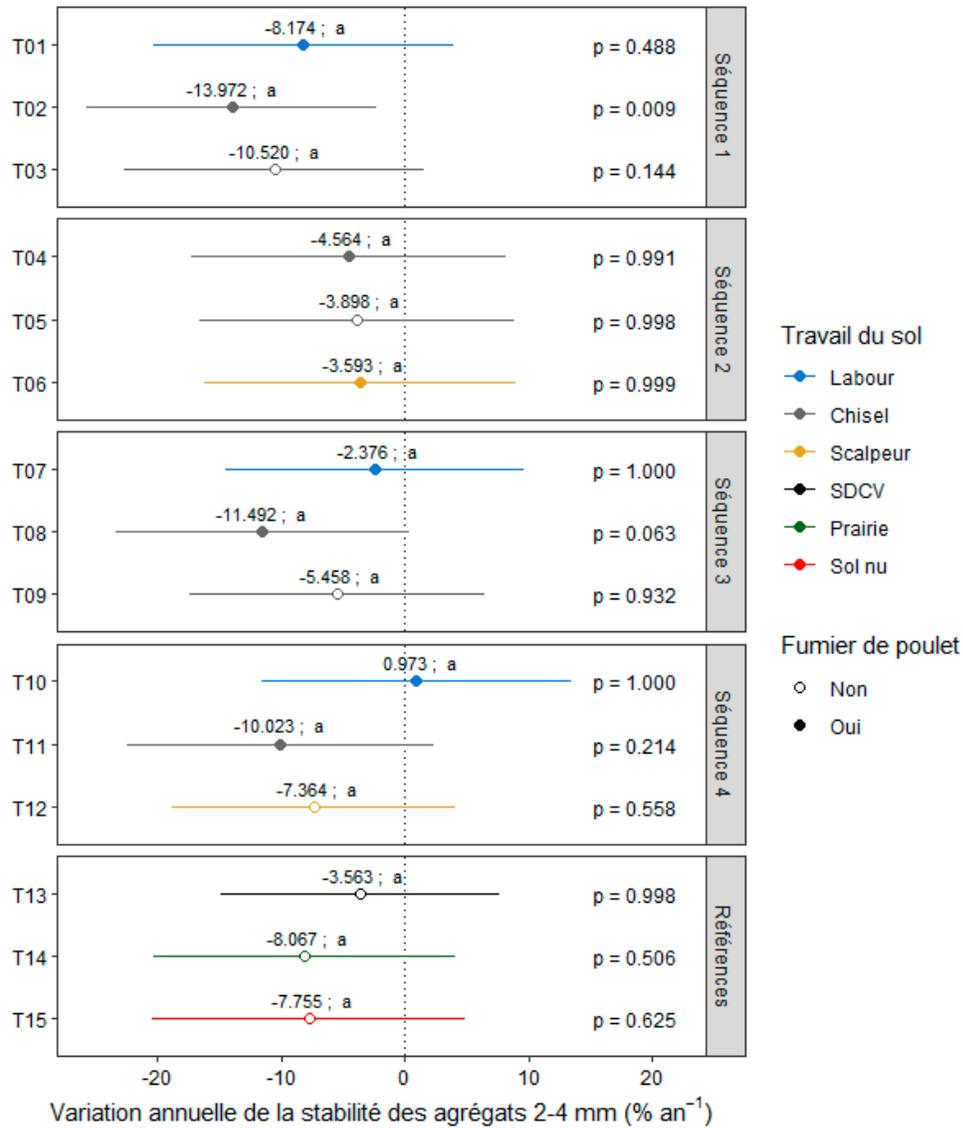


Figure 27 : Coefficient de régression de la relation linéaire entre de la stabilité des agrégats 2-4 mm et les années (2020 à 2022). Le point représente l'estimation du coefficient (pente), les lettres regroupent les pentes qui ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %, la ligne horizontale représente l'intervalle de confiance à 95 % de la pente et la valeur-p la probabilité que la pente ne soit pas différente de zéro.

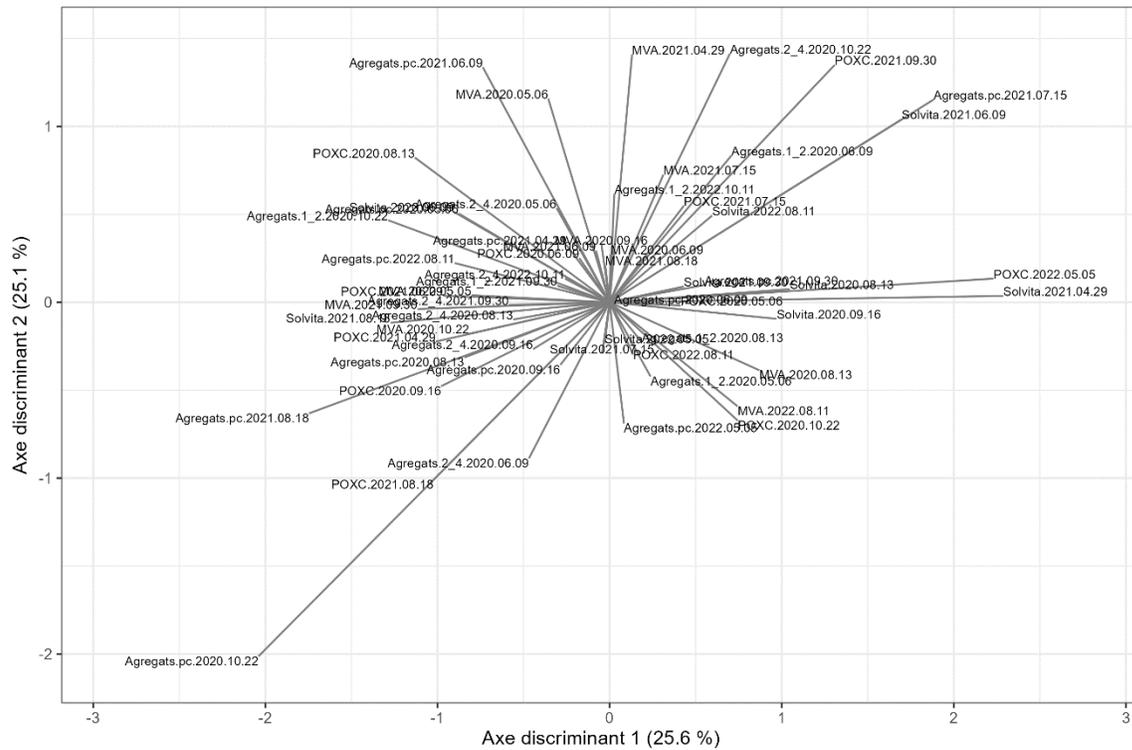
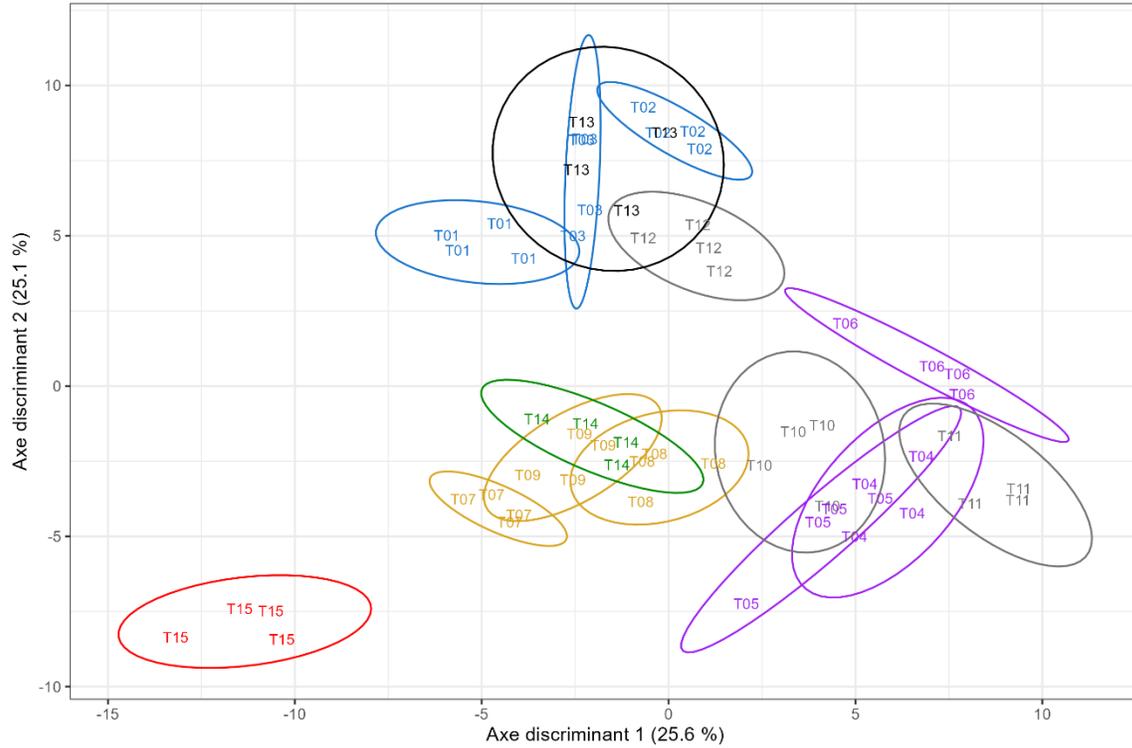
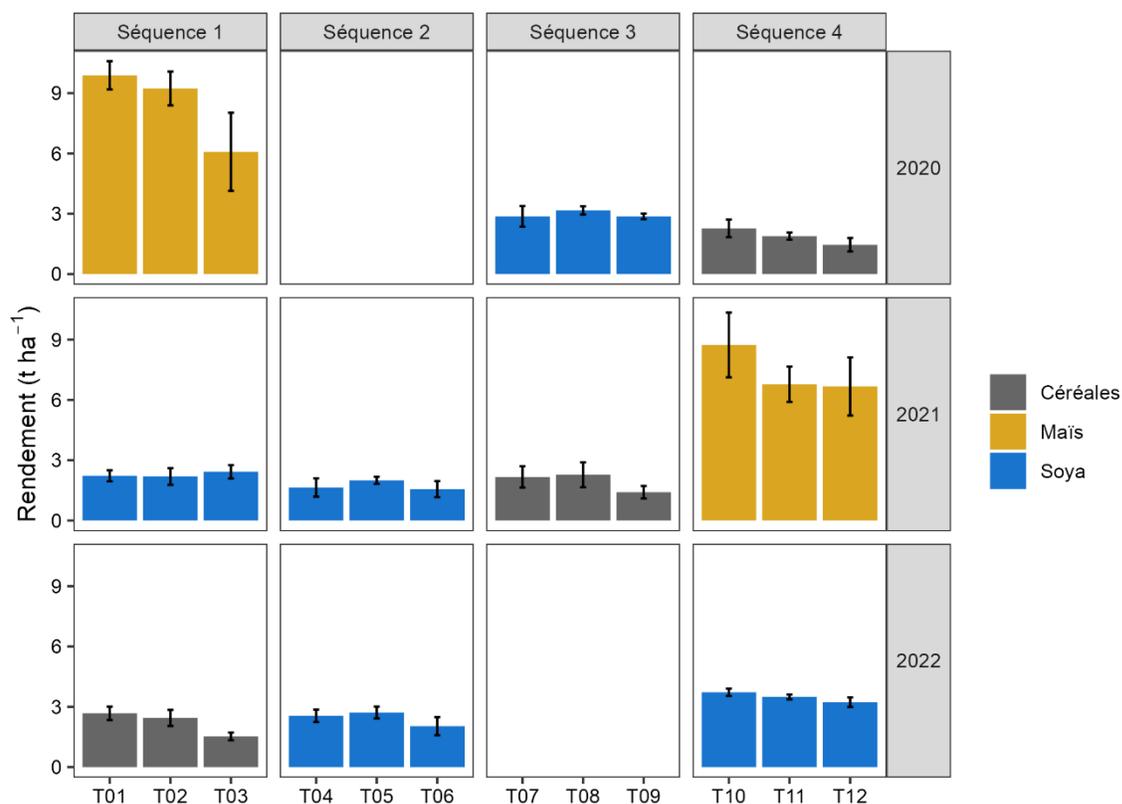


Figure 28 : Analyse discriminante linéaire des traitements par les indicateurs de santé des sols. Les séquences et les traitements de référence sont représentés par couleur.

ANNEXE 3 : Analyse des rendements en relation avec les indicateurs



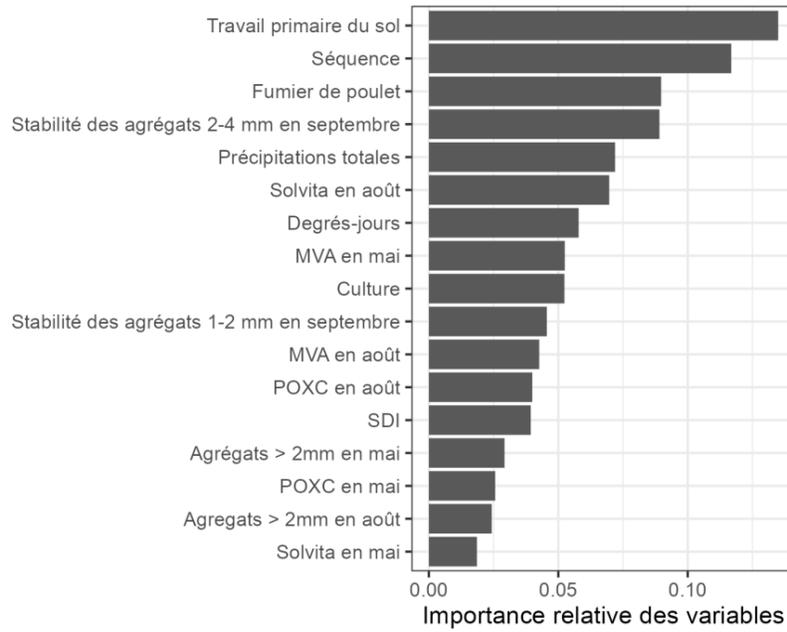


Figure 30 : Importance relative moyenne des variables explicatives du rendement.

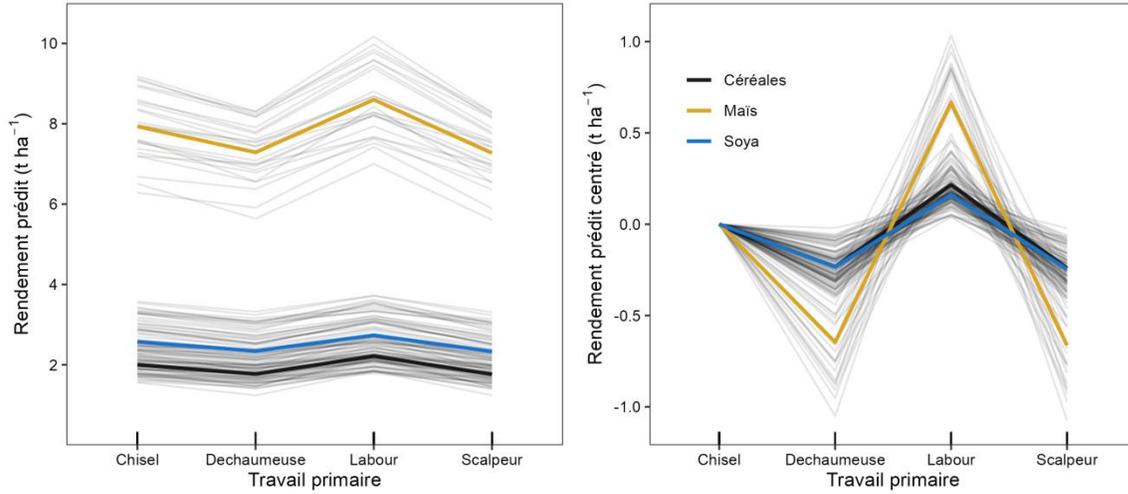


Figure 31 : Relation entre le type de travail du sol et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle).

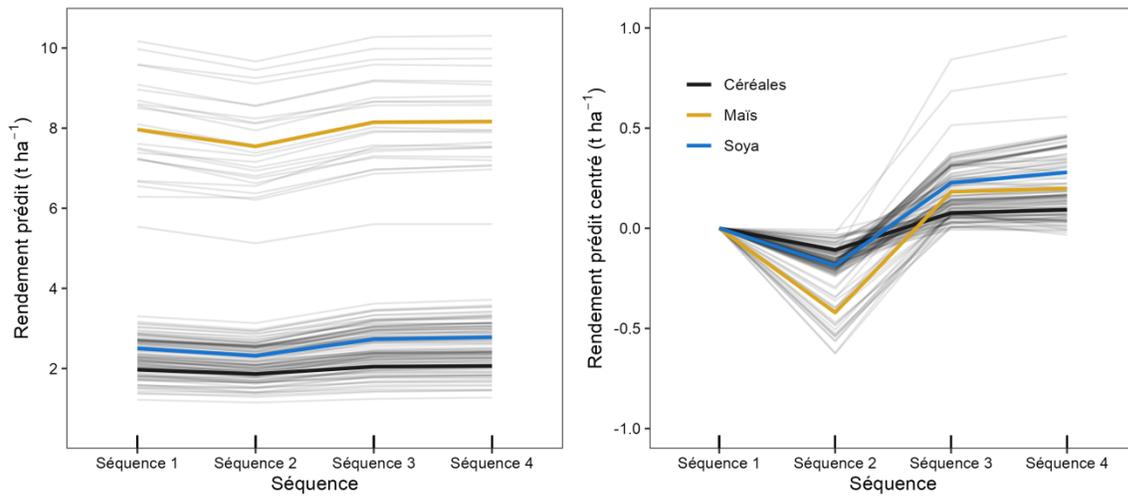


Figure 32 : Relation entre la séquence et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle).

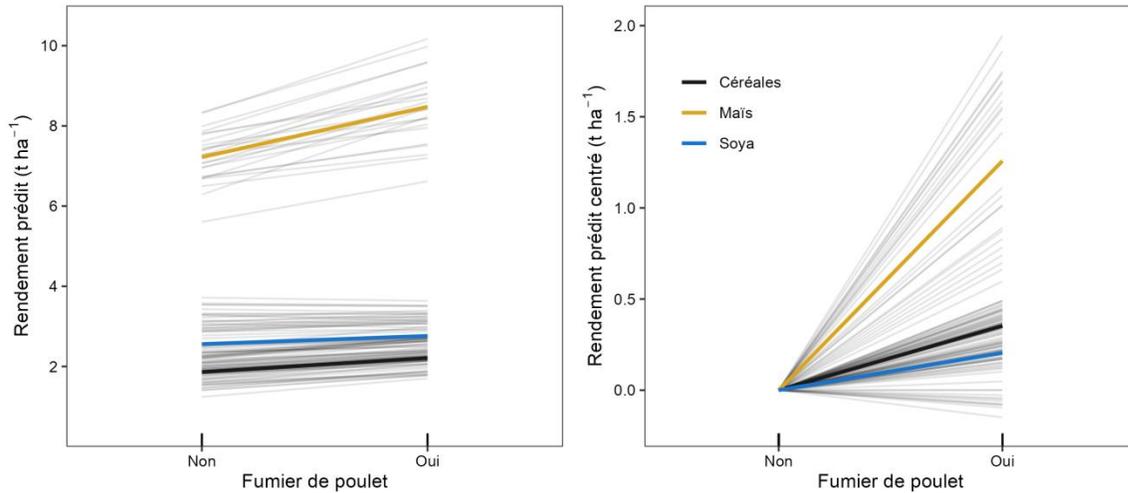


Figure 33 : Relation entre le fumier de poulet et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle).

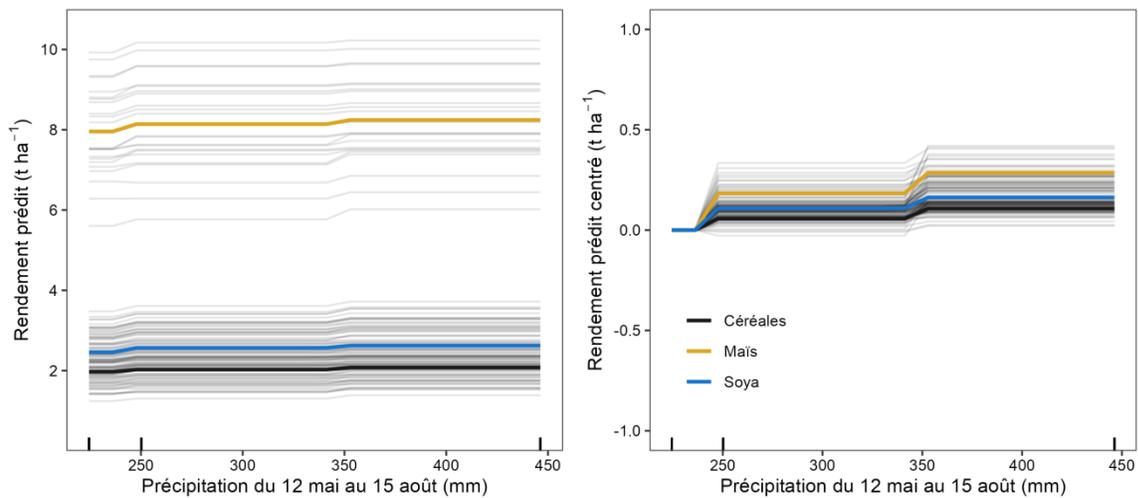


Figure 34 : Relation entre précipitations totales du 12 mai au 15 août et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

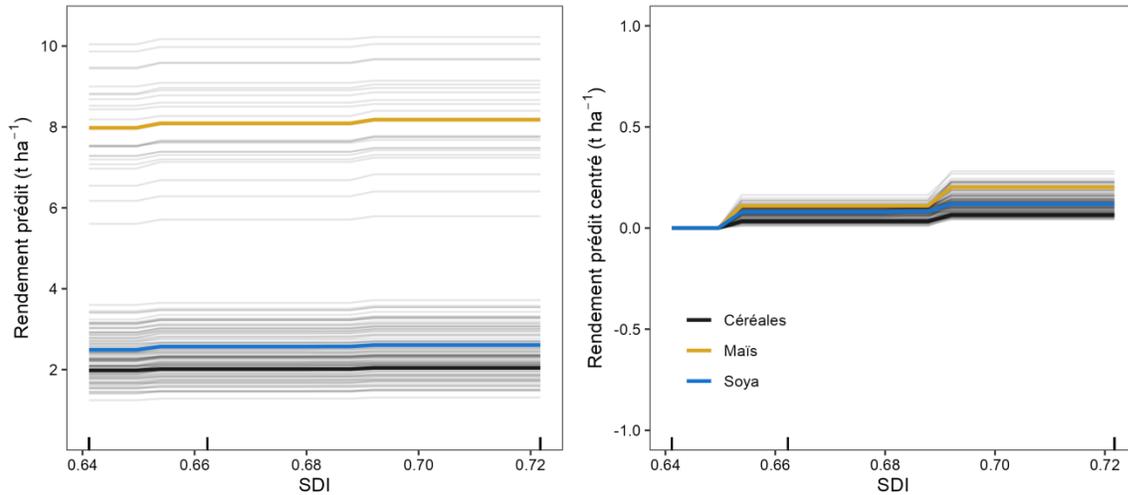


Figure 35 : Relation entre l'indice de répartition des précipitations (SDI : Shannon diversity index) du 12 mai au 15 août et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

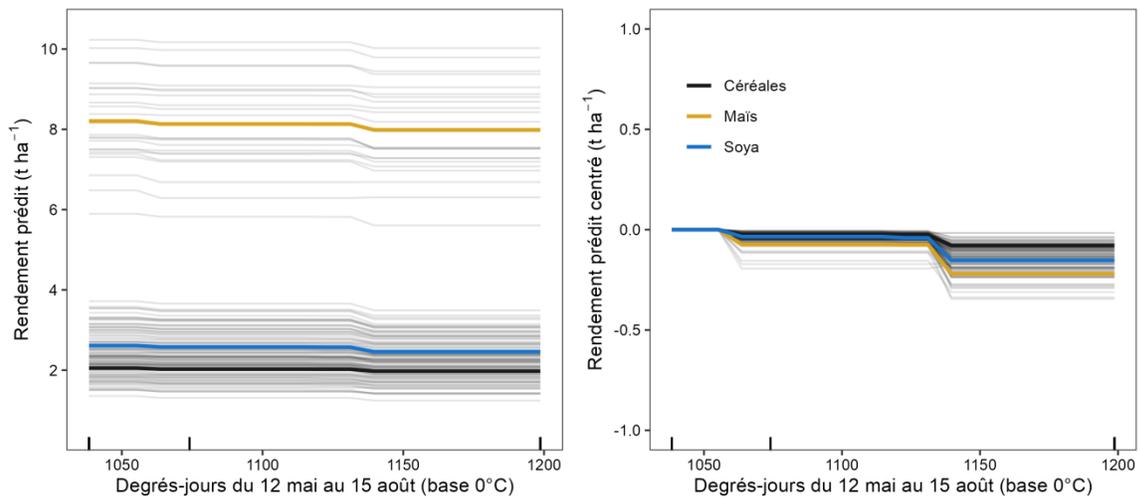


Figure 36 : Relation entre les degrés-jours base 0°C du 12 mai au 15 août et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

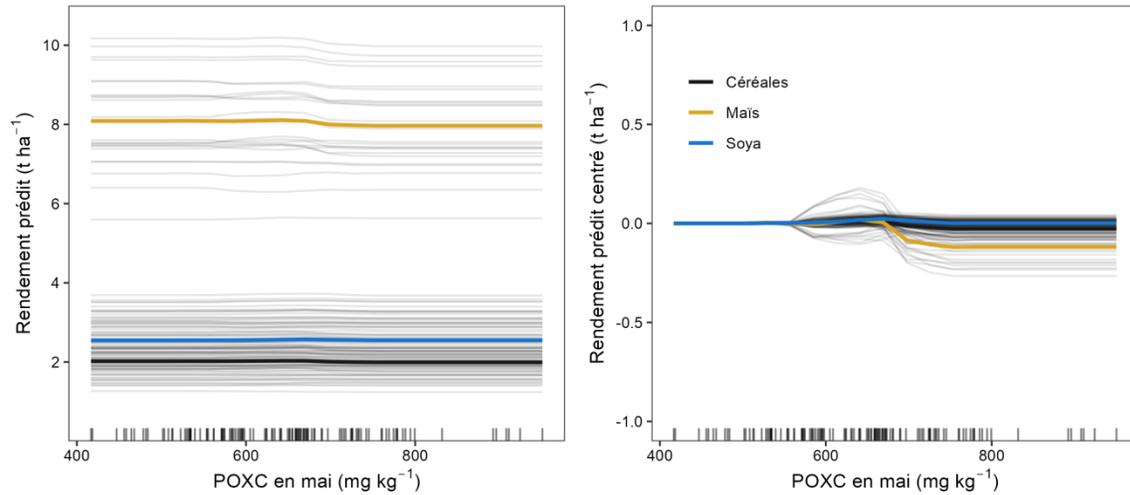


Figure 37 : Relation entre le carbone labile (POxC) mesuré en mai et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

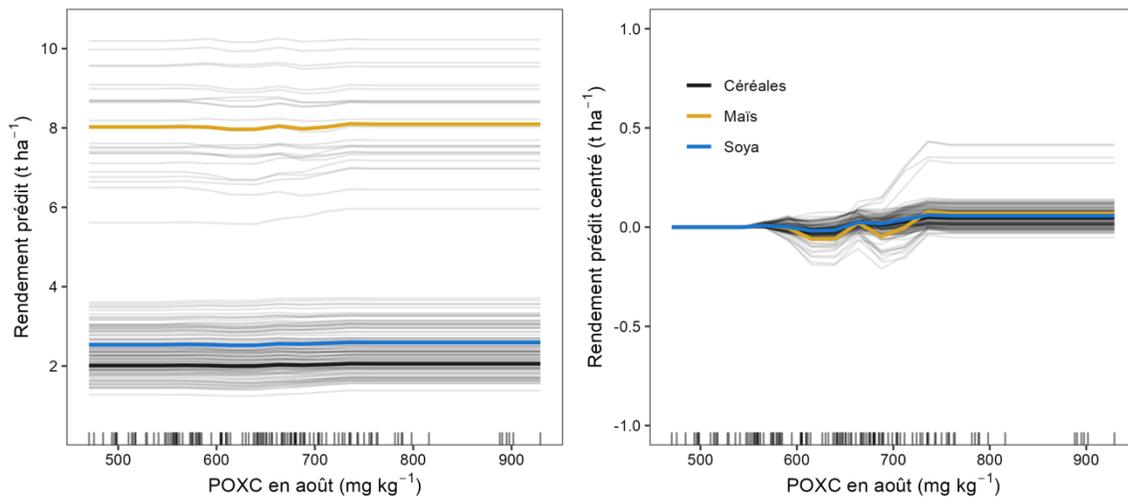


Figure 38 : Relation entre le carbone labile (POxC) mesuré en août et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

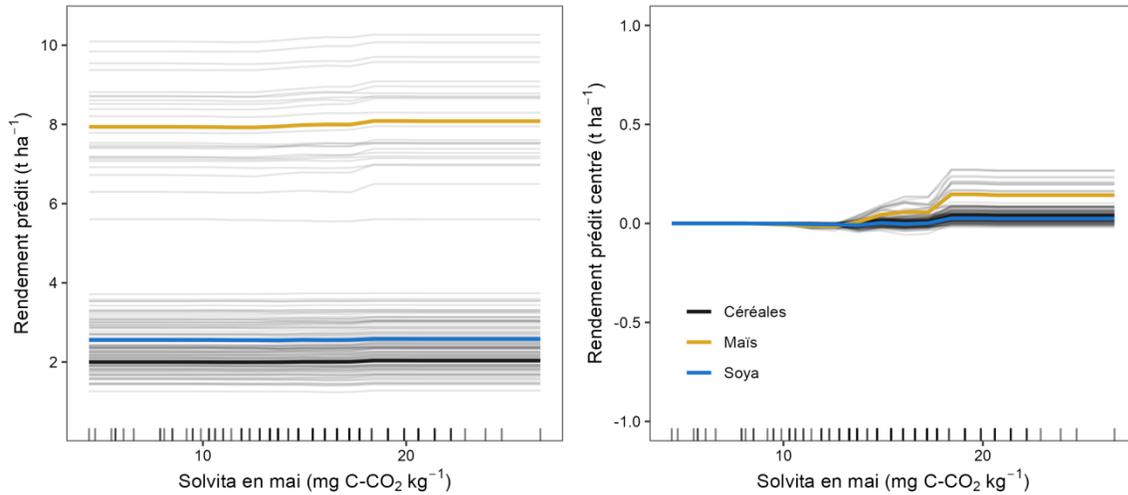


Figure 39 : Relation entre la respiration du sol (test Solvita) mesuré en mai et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

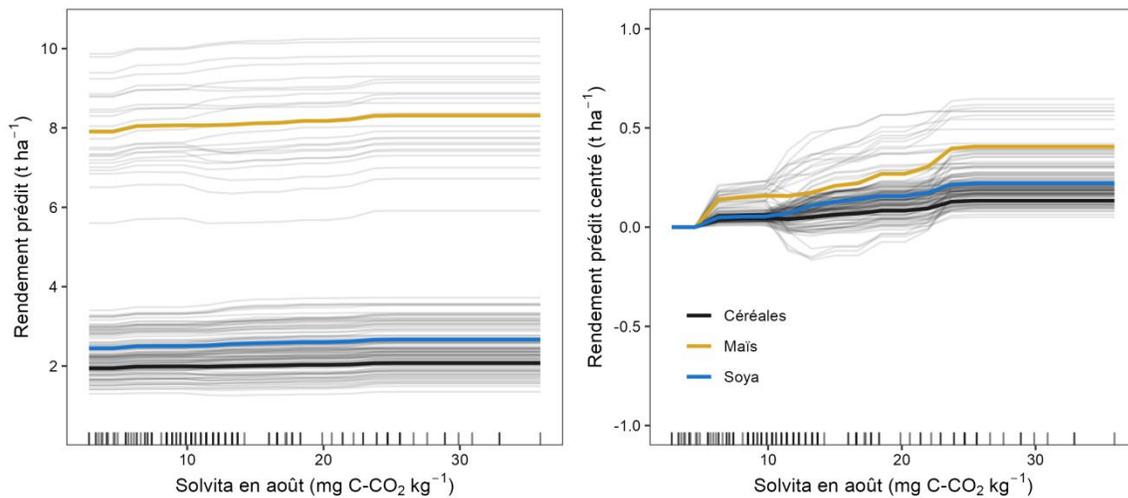


Figure 40 : Relation entre la respiration du sol (test Solvita) mesuré en août et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

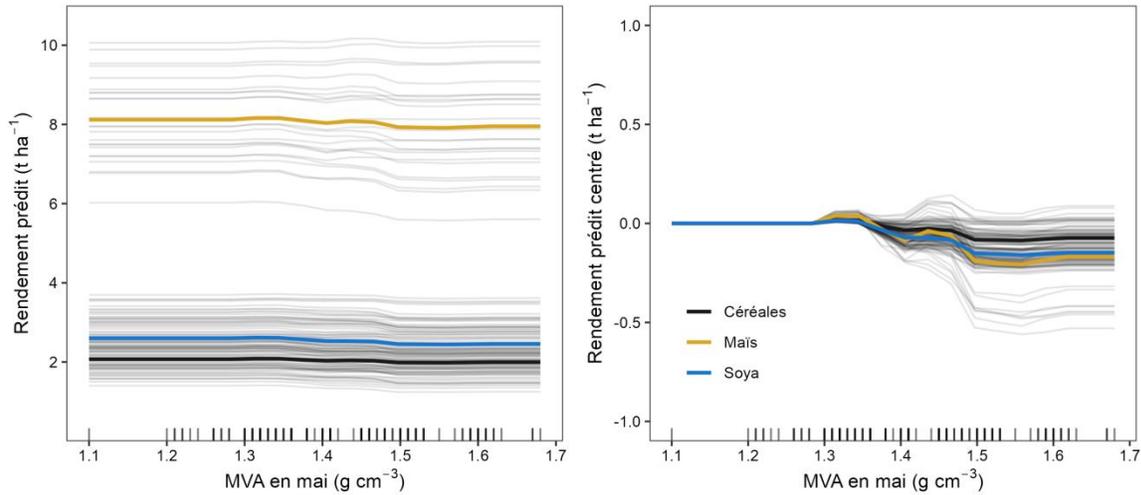


Figure 41 : Relation entre la masse volumique apparente (MVA) mesurée en mai et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

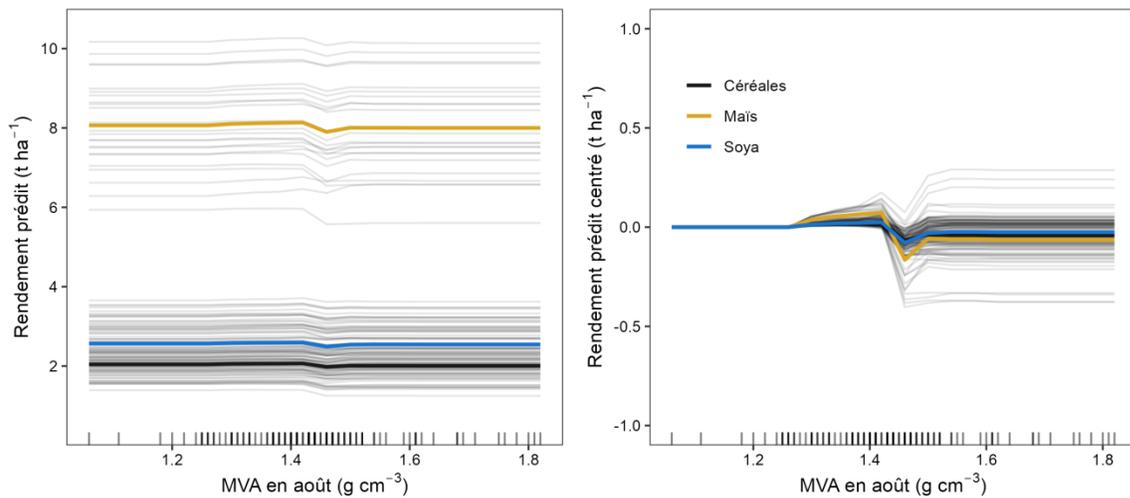


Figure 42 : Relation entre la masse volumique apparente (MVA) mesurée en août et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

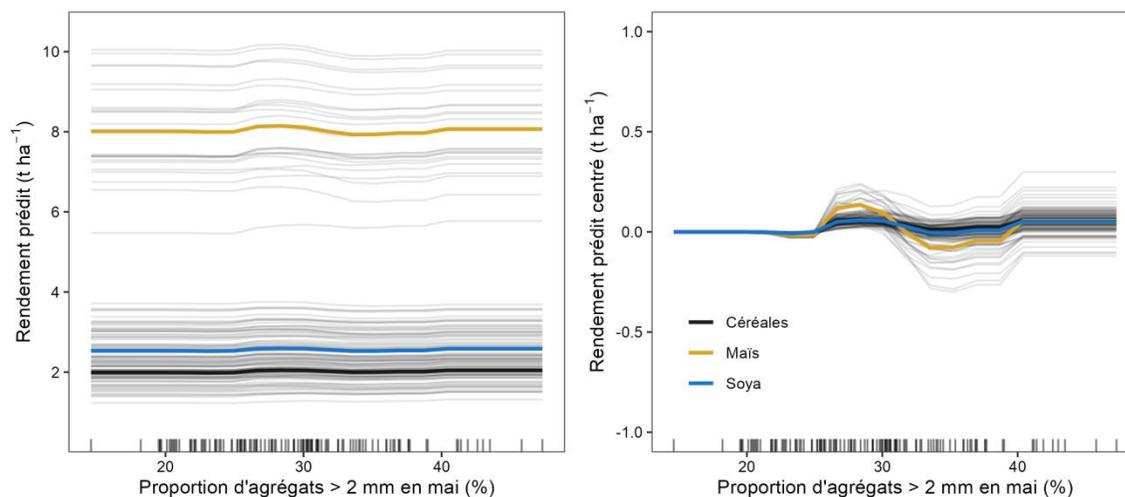


Figure 43 : Relation entre la proportion d'agrégats > 2 mm mesurée en mai et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

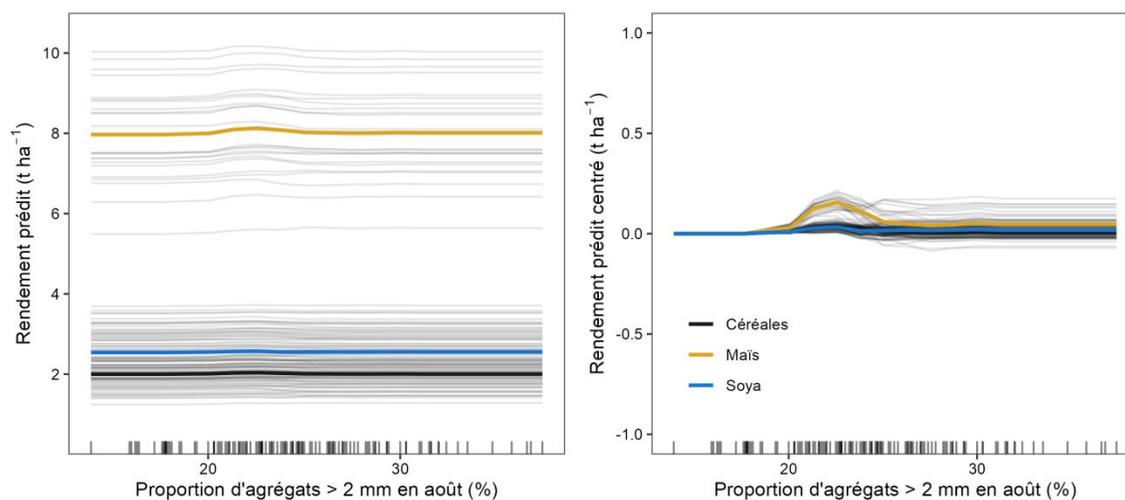


Figure 44 : Relation entre la proportion d'agrégats > 2 mm mesurée en août et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

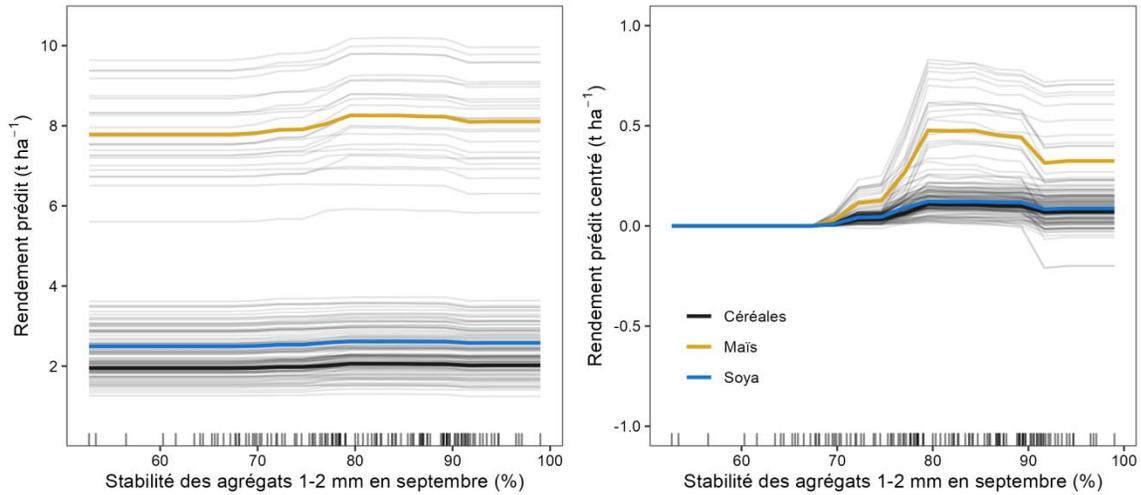


Figure 45 : Relation entre la stabilité des agrégats 1-2 mm mesurée en septembre et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

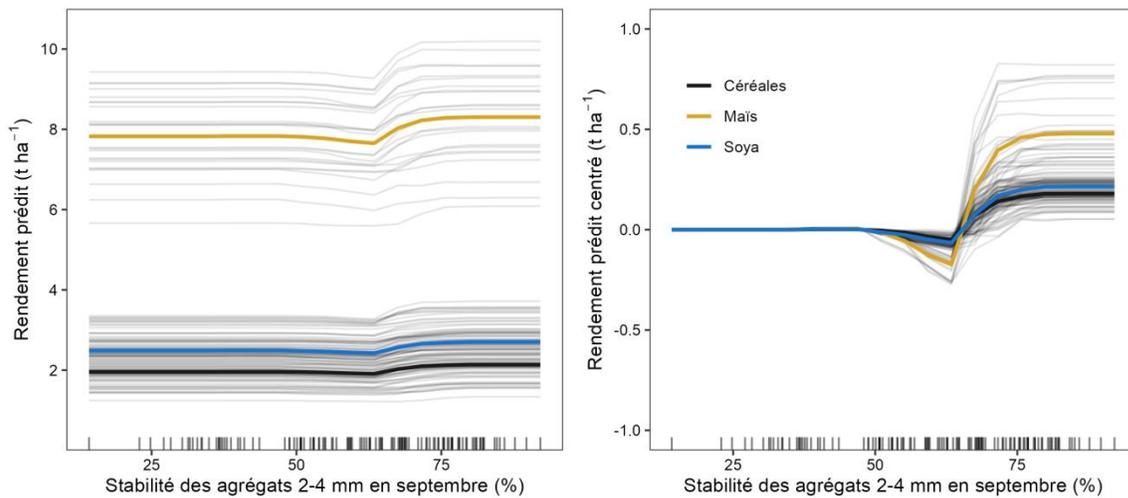


Figure 46 : Relation entre la stabilité des agrégats 2-4 mm mesurée en septembre et le rendement prédit. Les lignes colorées foncées représentent l'effet marginal par culture (dépendance partielle) et les lignes grises représentent cet effet pour chacune des parcelles (espérance conditionnelle individuelle). Les barres verticales sur l'axe des abscisses illustrent la distribution des valeurs observées.

ANNEXE 4 : Méthodes d'analyses statistiques

Les données du dispositif en blocs complets aléatoires en mesures répétées selon plusieurs dates d'échantillonnage ont été analysées à partir de modèles mixtes. Ces modèles ont été formalisés en considérant les facteurs date d'échantillonnage et traitement à effets fixes et les facteurs bloc et parcelle à effets aléatoires. En effet, les blocs sont supposés être représentatifs du site, donc à effet aléatoire, et les mesures répétées dans le temps sont corrélées pour chacune des parcelles, donc l'effet parcelle dans le bloc est aléatoire. Les hypothèses de normalité, d'indépendance et d'homoscédasticité des effets aléatoires ont été vérifiées visuellement sur les graphiques des résidus des modèles. Une transformation a été appliquée aux données d'agrégation pour corriger les distributions non-normales des résidus. Les valeurs suspectes selon le test de Grubbs à un seuil de 0,05 sur les résidus normalisés ont été retirées. Des analyses de variance ont été réalisées par année et pour l'ensemble des années. Les degrés de liberté (ddl) ont été estimés par la méthode Kenward-Roger. À partir des périodes d'échantillonnage communes à chaque année, les modèles mixtes ont permis d'ajuster des coefficients de régression pour modéliser la variation annuelle des indicateurs par traitement. Les p-valeurs des contrastes entre les moyennes et entre les coefficients de régressions ont été ajustées par la méthode Sidak pour tenir compte de la multiplicité des tests. Une analyse discriminante linéaire a été réalisée à partir de l'ensemble des observations par indicateur et par date d'échantillonnage pour évaluer leur capacité à discriminer les traitements.

Un modèle explicatif du rendement des cultures de céréales, maïs et soya a été élaboré par apprentissage automatique afin d'explorer l'effet des indicateurs de santé, des variables des itinéraires (travail primaire du sol, fumier de poulet, séquence culturale, culture récoltée) et des variables climatiques (degrés-jours à 0°C, précipitations totales, indice de répartition des précipitations (SDI : Shannon diversity index)). Étant donné le nombre restreint d'observations, l'analyse a été réalisée avec l'ensemble des cultures à partir des rendements standardisés par culture (centrés avec la moyenne générale et divisés par l'écart-type). Seulement les dates d'échantillonnage relativement communes (même mois) pour les trois années des indicateurs ont été utilisées pour cette analyse. Les variables climatiques ont été compilées pour les périodes du 12 mai au 15 août en lien avec les dates d'échantillonnage des indicateurs de santé des sols retenues pour cette analyse. Ainsi, les indices climatiques ne sont pas parfaitement ajustés avec les spécificités des cultures (période de croissance, température de base des degrés-jours). La technique par gradient boosting machines (GBM) a permis d'obtenir la meilleure performance de prédiction du rendement standardisé en validation croisée à 5 blocs avec une itération de 10 calibrations. Une transformation inverse des rendements standardisés par culture a été appliquée pour les graphiques de dépendance partielle afin de faciliter l'interprétation.

Les analyses statistiques ont été réalisées dans l'environnement statistique R (R Development Core Team, 2022) avec le module lme4 (Bates et al. 2015) pour ajuster les modèles mixtes, le module outliers (Komsta 2022) pour vérifier la présence de résidus suspects, le module lmerTest (Kuznetsova et al. 2017) pour obtenir les tableaux d'analyse de variance et le calcul de p-valeurs, le module emmeans (Lenth 2023) pour le calcul des moyennes, des coefficients de régression (tendances linéaires), des intervalles de confiance

et des contrastes, le module multcomp (Hothorn et al. 2008) pour la réalisation de groupes homogènes, le module MASS (Venables et al. 2002) pour l'analyse discriminante linéaire, le module h2o (Fryda et al. 2023) pour la modélisation par apprentissage automatique et pour obtenir l'importance relative, la dépendance partielle et l'espérance conditionnelle individuelle des variables explicatives des modèles et finalement, le module ggplot2 (Wickham 2016) pour la visualisation des données.

Références

Bates, D., Maechler, M., Bolker, B. et Walker, S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48. doi:10.18637/jss.v067.i01.

Fryda, T, LeDell, E, Gill, N, Aiello, S, Fu, A, Candel, A, Click, C, Kraljevic, T, Nykodym, T, Aboyou, P, Kurka, M, Malohlava, M, Poirier, S et Wong, W. 2023. `_h2o`: R Interface for the 'H2O' Scalable Machine Learning Platform. R package version 3.42.0.1, <https://CRAN.R-project.org/package=h2o>.

Hothorn, T., Bretz, F. et Westfall, P. 2008. Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal*, 50(3), 346-363.

Komsta, L. 2022. `outliers`: Tests for Outliers. R package version 0.15, <https://CRAN.R-project.org/package=outliers>.

Kuznetsova, A., Brockhoff, P.B. et Christensen, R.H.B. 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82(13), 1-26. doi:10.18637/jss.v082.i13. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>.

Lenth, R. 2023. `emmeans`: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.8.4-1, <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>.

R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org/>.

Venables, W. N. et Ripley, B. D. 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0

Wickham, H. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag, New York.