

Salson Ludivine



Effet du digestat de méthanisation sur la qualité et la fertilité des sols



Table des matières

I. Introduction	4
Contexte général	4
Historique des travaux réalisés	4
Les objectifs de cette nouvelle campagne de prélèvements	4
II. Matériels et méthodes	5
Sélection des parcelles	5
Choix des indicateurs	6
Protocole de prélèvements	6
Analyses statistiques	7
III. Présentation des exploitations agricoles et des parcelles	7
Ferme A	7
Ferme B	8
Ferme C	9
Ferme D	9
Ferme E	10
IV. Résultats des prélèvements 2022	11
Densité apparente	11
Matière organique	12
Capacité d'échange cationique	14
Biomasse Microbienne Carbonée (en % C/kg sol sec)	15
Biomasse Microbienne Azotée	16
Ratio Biomasse Microbienne Carbonée sur Biomasse Microbienne Azotée	17
Activité enzymatique	19
V. Résultats combinés des prélèvements 2020-2022	20
Présentation des nouvelles exploitations agricoles	20
Effet du digestat	21
VI. Synthèse des résultats	23
VII. Discussion	24
VIII. Conclusion	24
IX. Bibliographie	26
X. Annexes	27

Table des illustrations

Figure 1: Densité apparente en fonction de l'épandage de digestat (n=12)	11
Figure 2: Densité apparente en fonction de la texture du sol (n=12)	11
Figure 3: Densité apparente en fonction de la conduite d'exploitation (n=12)	12
Figure 4: Densité apparente en fonction du type de travail du sol (n=12)	12
Figure 5: Teneur en matière organique en fonction de l'épandage de digestat (n=12)	12
Figure 6: Teneur en matière organique en fonction de la texture du sol (n=12)	13
Figure 7: Teneur en matière organique en fonction de la conduite d'exploitation (n=12)	13
Figure 8: Teneur en matière organique en fonction du type de travail du sol (n=12)	13
Figure 9: CEC Metson en fonction de l'épandage de digestat (n=12)	14
Figure 10: CEC Metson en fonction de la texture du sol (n=12)	Erreur ! Signet non défini.
Figure 11: CEC Metson en fonction du type de travail du sol (n=12)	14
Figure 12: CEC Metson en fonction de la conduite d'exploitation (n=12)	14
Figure 13: CEC Metson en fonction de lu pH du sol (n=12)	Erreur ! Signet non défini.
Figure 14: BMC en fonction de l'épandage de digestat (n=12)	15
Figure 15: BMN en fonction de l'épandage de digestat (n=12)	16
Figure 16: BMN en fonction de la texture du sol (n=12)	17
Figure 17: Ratio BMC/BMN en fonction de l'épandage de digestat (n=12)	17
Figure 18: Ratio BMC/BMN en fonction de la texture du sol (n=12)	18
Figure 19: Ratio BMC/BMN en fonction de la conduite d'exploitation (n=12)	18
Figure 20: Schéma des voies de synthèse impliquant les enzymes étudiées (Source : Séverine Piutti, LAE – Université de Nancy)	19
Figure 21: Activité enzymatique en fonction de l'épandage de digestat (n=12)	19
Figure 22: Indicateurs sélectionnés en fonction de l'épandage de digestat (n=8)	22
Figure 22: Mazzoni, 2021, « Synthèse des indicateurs et protocoles », p.8	27
Figure 23: Mazzoni, 2021, « Synthèse des indicateurs et protocoles », p.8	Erreur ! Signet non défini.

I. Introduction

Contexte général

La méthanisation est une filière en plein essor et présente de nombreux avantages qu'ils soient énergétiques, économiques ou dans la gestion des déchets. Malgré cela, certaines craintes émergent notamment sur l'utilisation du digestat. Les scientifiques s'intéressant de plus en plus au digestat ont permis d'enrichir les connaissances sur la qualité du digestat. Cependant une question reste toujours en suspens, celle de l'impact du digestat sur la qualité et la fertilité des sols qui reste encore une source de débat. Des projets scientifiques commencent à voir le jour notamment celui de MéthaBioSol, et c'est également dans cette optique que l'AAMF travaille depuis 2020 sur les effets du digestat sur le sol.

Historique des travaux réalisés

Une première phase de travaux a eu lieu en 2020-2021 : L'Association des Agriculteurs Méthaniseur de France, en partenariat avec les écoles d'agronomie de Beauvais, Lille, Nancy et Rennes, a réalisé un projet pédagogique sur l'observation des effets du digestat sur le sol. Pour cela, chaque groupe d'étudiant a sélectionné des indicateurs sur la qualité des sols ainsi que plusieurs exploitations agricoles à proximité de leur établissement scolaire. Le but était de comparer des sols recevant régulièrement du digestat et des sols dits « témoins » qui n'en n'ont jamais reçu.

Les résultats des différentes écoles ont ensuite été retraités et compilés lors d'un stage, effectué par Anne Mazzoni en 2021, qui a abouti à une base de données des plus complète, une analyse statistique des données globales et une synthèse de cette phase 1.

En 2022, l'AAMF exécute la deuxième phase de ses travaux en lançant une nouvelle campagne de prélèvements.

Les objectifs de cette nouvelle campagne de prélèvements

Cette nouvelle campagne de prélèvement a pour but d'enrichir la base de données, de continuer les analyses statistiques et d'avoir une meilleure interprétation des résultats. Nous avons sélectionné de nouvelles exploitations agricoles avec une sélection des parcelles plus rigoureuses. L'échantillonnage des parcelles a été réalisé en mai 2022, en période de sécheresse.

L'effet du digestat sera étudié sur plusieurs indicateurs de la qualité du sol, ainsi que l'effet de facteurs autres que le digestat. Les analyses ont été faites uniquement sur les données obtenues cette année puis ont été faites sur une sélection de fermes avec les meilleures comparaisons de parcelles.

II. Matériels et méthodes

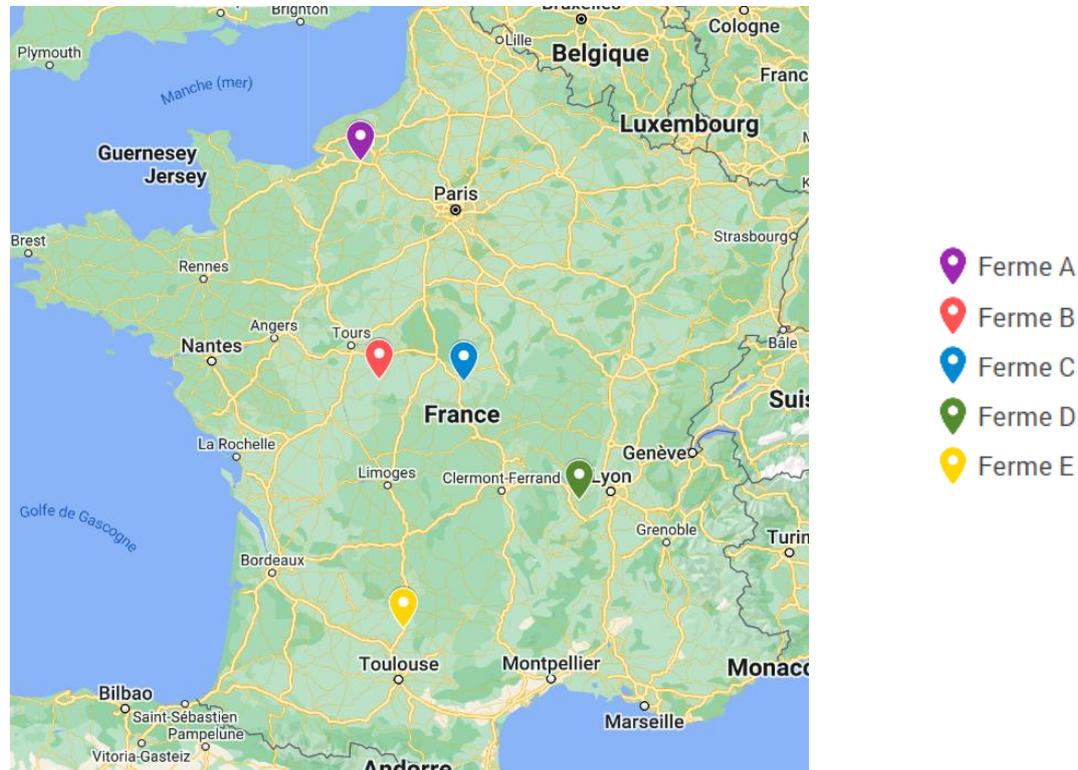
Sélection des parcelles

Les travaux réalisés précédemment nous ont permis d'être plus rigoureux dans le choix des parcelles. En effet, afin d'assurer la meilleure comparaison possible entre un sol ayant reçu du digestat et un sol n'en ayant pas reçu, nous avons sélectionné 1 à 2 parcelles en culture par ferme avec :

- Soit 2 parcelles similaires (même type de sol, conduite et rotations similaires), l'une recevant du digestat et l'autre non.
- Soit une seule parcelle ayant une zone épandue avec du digestat et une zone non épandue ou épandue avec un autre fertilisant (par exemple, bande témoin...).

Une des conditions les plus importantes lors de la sélection des parcelles était de ne pas avoir de parcelle en culture en comparaison avec une prairie permanente. En effet, lors des analyses réalisées par Anne Mazzoni le fait d'avoir une prairie permanente introduisait un énorme biais quant à la comparaison avec et sans digestat, l'effet prairie permanente étant beaucoup plus important que l'effet digestat sur la vie biologique du sol (Ce qui est confirmé par la littérature).

Nous avons également fait le choix de chercher des volontaires dans seulement quatre régions de France qui sont : la Normandie, le Centre-Val-de-Loire, l'Auvergne-Rhône-Alpes et l'Occitanie pour être complémentaire à la campagne d'échantillonnage du projet MéthaBioSol et à celles des projets des étudiants des années précédentes afin d'éviter de solliciter les mêmes agriculteurs.



Finalement 5 exploitations agricoles ont été sélectionnés (la ferme A comprend deux groupes de parcelles distincts) :

- La ferme A.1 en Normandie, avec une parcelle possédant une zone non épandue à cause de la proximité avec les riverains.
- La ferme A.2 en Normandie, avec deux parcelles similaires.
- La ferme B en Centre-Val-de-Loire, avec une parcelle possédant une zone non épandue à cause d'une trop forte pente.
- La ferme C en Centre-Val-de-Loire, avec une parcelle possédant une zone non épandue à cause de la proximité avec les riverains.
- La ferme D en Auvergne-Rhône-Alpes, avec deux parcelles similaires.
- La ferme E en Occitanie, avec une parcelle possédant une zone non épandue à cause de la proximité avec les riverains.

Choix des indicateurs

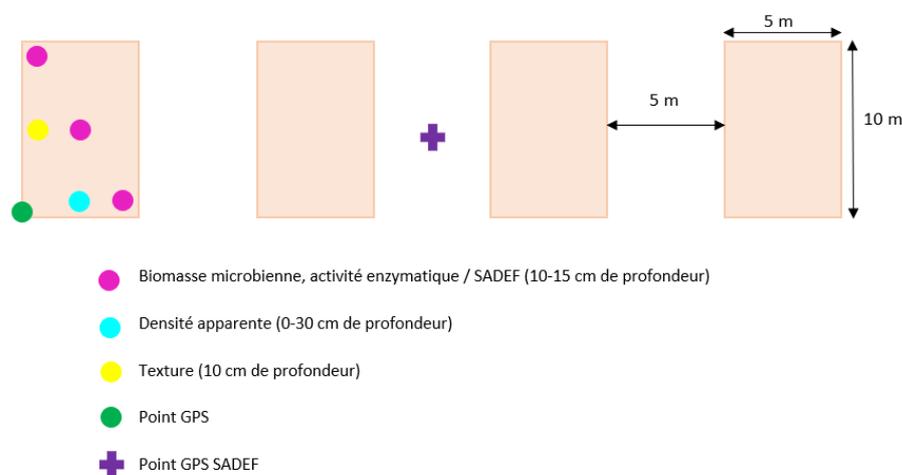
En 2020, les étudiants ont analysé beaucoup d'indicateurs. Nous avons fait le choix de nous intéresser aux indicateurs qui nous semblaient être les plus pertinents suite aux résultats obtenus dans la première phase. Voici les indicateurs choisis :

- La densité apparente : analysée par le Laboratoire Sols et Environnement (LSE) de l'université de Lorraine
- La biomasse microbienne et l'activité enzymatique : analysées par le Laboratoire Agronomie et Environnement (LAE) de l'université de Lorraine
- Le profil agronomique du sol : analysé par le laboratoire SADEF
- L'abondance et la diversité des vers de terre

Les vers de terre n'auront finalement pas été prélevés à cause des conditions climatiques. En effet, durant la campagne d'échantillonnage qui se tenait au mois de mai 2022 la plupart des régions de France était en période de sécheresse.

Protocole de prélèvements

Les prélèvements ont été faits suivant le plan d'échantillonnage suivant avec quatre blocs par parcelle :



Les protocoles de prélèvements sont présentés dans l'annexe.

Août 2022

Analyses statistiques

Des analyses statistiques ont été réalisées afin de connaître si l'effet d'un facteur sur une variable (ici, les indicateurs) est significatif, ce qui permet une meilleure interprétation des résultats. Concernant les analyses statistiques, des analyses de la variance (ANOVA) à 1 facteur ont été faites lorsque les conditions d'application de ce test étaient respectées. Dans le cas contraire le test de Kruskal-Wallis a été appliqué, il s'agit d'un test non paramétrique c'est-à-dire moins robuste statistiquement mais ne nécessitant pas de conditions particulières pour pouvoir être utilisé. Nous avons fait le choix d'utiliser ces tests puisqu'ils nous permettent de vérifier si les modalités d'un facteur (comme par exemple, avec digestat et sans digestat) ont un effet mesurable sur une variable indépendante (comme par exemple, la densité apparente du sol ou la biomasse microbienne carbonée).

III. Présentation des exploitations agricoles et des parcelles

Ferme A

Il s'agit d'une exploitation agricole spécialisée en culture céréalière située dans le département de l'Eure (27). La mise en service de l'unité de méthanisation date de l'année 2015 et à un digestat brut de catégorie 2 selon Concept-Dig.

Sur ce site, 3 parcelles ont été prélevées avec une parcelle possédant une zone non épandue (riverain) (A.1) et deux parcelles similaires (A.2). Les prélèvements ont été réalisés le 30 mai 2022 en période de sécheresse.

Comparaison A.1

Parcelle avec digestat

- Occupation du sol : Maïs ensilage
 - Rotation : Blé – Maïs ensilage – Blé – Betterave sucrière
 - Interculture : Ray-Grass
 - Sol : Limons
 - pH = 6,8
 - Travail du sol : Labour
 - Autres produits organiques : Aucun
 - Fertilisation minérale : 200 unités d'azote
- ⇒ Epandage de digestat brut depuis 2016 (Apport de 40m³/ha de digestat/an ?)

Parcelle sans digestat

- Occupation du sol : Maïs ensilage
- Rotation : Blé – Maïs ensilage – Blé – Betterave sucrière
- Interculture : Ray-Grass
- Sol : Limons
- pH = 6,5
- Travail du sol : Labour
- Autres produits organiques : Aucun
- Fertilisation minérale : 200 unités d'azote

Comparaison A.2

Parcelle avec digestat

- Occupation du sol : Betterave sucrière
- Rotation : Blé – Méteil – Blé – Betterave sucrière
- Interculture : Ray-Grass
- Sol : Limons
- pH = 7,2
- Travail du sol : Labour
- Autres produits organiques : Aucun
- Fertilisation minérale : 200 unités d'azote
- ⇒ Epannage de digestat brut depuis 2016 (Apport de 40m³/ha de digestat)

Parcelle sans digestat

- Occupation du sol : Betterave sucrière
- Rotation : Blé – Méteil – Blé – Betterave sucrière
- Interculture : Ray-Grass
- Sol : Limons
- pH = 7,8
- Travail du sol : Labour
- Autres produits organiques : Aucun
- Fertilisation minérale : 200 unités d'azote

- Agriculture Conventiennelle
- Parcelles non irriguées
- Pas de prairie dans les rotations

Ferme B

Il s'agit d'une exploitation agricole spécialisée dans l'élevage de porcins située dans le département de l'Indre (36). La mise en service de l'unité de méthanisation date de l'année 2010 et a un digestat liquide de catégorie 4 selon Concept-Dig.

Sur ce site, une seule parcelle a été prélevée puisqu'elle possède une zone non épandue (pente trop forte). Les prélèvements ont été réalisés le 20 mai 2022 en période de sécheresse.

Parcelle avec digestat

- Occupation du sol : Blé
- Rotation : Blé – Colza – Blé
- Interculture : Luzerne
- Sol : Limons Argilo-Sableux
- pH = 7,3
- Travail du sol : Pas de travail du sol
- Autres produits organiques : Aucun
- Fertilisation minérale : 35 unités d'azote
- ⇒ Epannage de digestat liquide depuis 2012 (Apport de 30m³/ha de digestat)

Parcelle sans digestat

- Occupation du sol : Blé
- Rotation : Blé – Prairie temporaire – Blé
- Interculture : Ray-Grass
- Sol : Limons Argilo-Sableux
- pH = 5,8
- Travail du sol : Pas de travail du sol
- Autres produits organiques : Aucun
- Fertilisation minérale : 130 unités d'azote

- Agriculture de Conservation des Sols
- Parcelles non irriguées
- Présence d'une prairie temporaire dans la rotation de la parcelle sans digestat

Ferme C

Il s'agit d'une exploitation agricole située dans le département de le Cher (18). La mise en service de l'unité de méthanisation date de l'année 2018 et à un digestat brut de catégorie 9, catégorie composée majoritairement de végétaux que nous avons rajoutés à celles de Concept-Dig.

Sur ce site, une seule parcelle a été prélevée puisqu'elle possède une zone non épandue (riverains). Les prélèvements ont été réalisés le 19 mai 2022 en période de sécheresse.

Parcelle avec digestat

- Occupation du sol : Quinoa
- Rotation : Quinoa – Sorgho – Blé – Tournesol
- Interculture : Sorgho, Tournesol
- Sol : Argilo-Limoneux
- pH = 6,6
- Travail du sol : Labour
- Autres produits organiques : Aucun
- Fertilisation minérale : NA
- ⇒ Epandage de digestat brut depuis 2021 (Apport de 20m³/ ha de digestat)

Parcelle sans digestat

- Occupation du sol : Quinoa
- Rotation : Quinoa – Sorgho – Blé – Tournesol
- Interculture : Sorgho, Tournesol
- Sol : Argilo-Limoneux
- pH = 8,1
- Travail du sol : Labour
- Autres produits organiques : Aucun
- Fertilisation minérale : NA

- Agriculture conventionnelle
- Parcelles non irriguées
- Pas de prairie dans la rotation

Ferme D

Il s'agit d'une exploitation agricole spécialisée dans l'élevage de bovins (laits) située dans le département de la Loire (42). La mise en service de l'unité de méthanisation date de l'année 2015.

Sur ce site, 2 parcelles ont été prélevées le 18 mai 2022. Les prélèvements ont été réalisés en période de sécheresse.

Parcelle avec digestat

- Occupation du sol : Sol nu (temporaire)
- Rotation : Méteil – Maïs grain
- Interculture : Maïs ensilage
- Sol : Sablo-Limoneux
- pH = 7,2
- Travail du sol : Décompactage
- Autres produits organiques : Compost (15T)
- Fertilisation minérale : 115 unités d'azote
- ⇒ Epandage de digestat brut depuis 2015 (Apport de 30m³/ha de digestat)

Parcelle sans digestat

- Occupation du sol : Maïs
- Rotation : Maïs – Prairie permanente retournée
- Interculture : Aucune
- Sol : Limons Argilo-Sableux
- pH = 6,3
- Travail du sol : Labour
- Autres produits organiques : Compost (15 T) + Fumier (30T)
- Fertilisation minérale : 11 unités d'azote + 25 unités de phosphore (P₂O₅)

- Agriculture de Conservation des Sols
- Parcelle avec digestat : irriguée
- Parcelle sans digestat : non irriguée
- La parcelle sans digestat est une ancienne prairie permanente.

Ferme E

Il s'agit d'une exploitation agricole spécialisée dans l'élevage de bovins située dans le département du Tarn-et-Garonne (82). La mise en service de l'unité de méthanisation date de l'année 2018 et a un digestat liquide de catégorie 1 selon Concept-Dig.

Sur ce site, une seule parcelle a été prélevée puisqu'elle possède une zone non épandue (riverains). Les prélèvements ont été réalisés le 25 mai 2022 en période de sécheresse.

Parcelle avec digestat

- Occupation du sol : Orge
- Rotation : Orge – Sorgho – Maïs
- Interculture : Aucune
- Sol : Argiles
- pH = 8,5
- Travail du sol : Décompactage
- Autres produits organiques : Aucun
- Fertilisation minérale : Aucune
- ⇒ Epandage de digestat liquide depuis 2019 (Apport de 30m³/ha de digestat)

Parcelle sans digestat

- Occupation du sol : Orge
- Rotation : Orge – Sorgho – Maïs
- Interculture : Aucune
- Sol : Argilo-Limoneux
- pH = 8,6
- Travail du sol : Décompactage
- Autres produits organiques : Aucun
- Fertilisation minérale : 160 unités d'azote

- Agriculture Conventionnelle
- Parcelles irriguées
- Pas de prairie dans la rotation

IV. Résultats des prélèvements 2022

Densité apparente

La densité apparente nous permet de caractériser la structure physique du sol. Pour une bonne structuration du sol, la densité apparente optimale est de $1,3 \text{ g/cm}^3$ (IDYST, « Détermination de masse volumique apparente ») afin d'avoir un sol assez dense pour limiter le tassement mais pour permettre le développement racinaire et la circulation de l'eau des gaz dans le sol.

Effet du digestat

Lecture graphique :

→ La densité apparente ne diffère pas en fonction de l'épandage de digestat.

⇒ Test statistique utilisé : Kruskal-Wallis

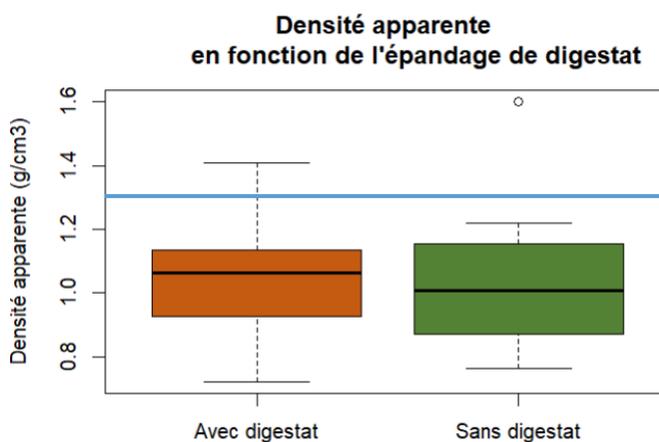


Figure 1: Densité apparente en fonction de l'épandage de digestat (n=12)



Pas d'effet significatif du digestat sur la densité apparente

Effet d'autres facteurs

D'autres facteurs ont des effets significatifs sur la densité apparente. C'est le cas de la texture du sol, la conduite d'exploitation et le travail du sol.

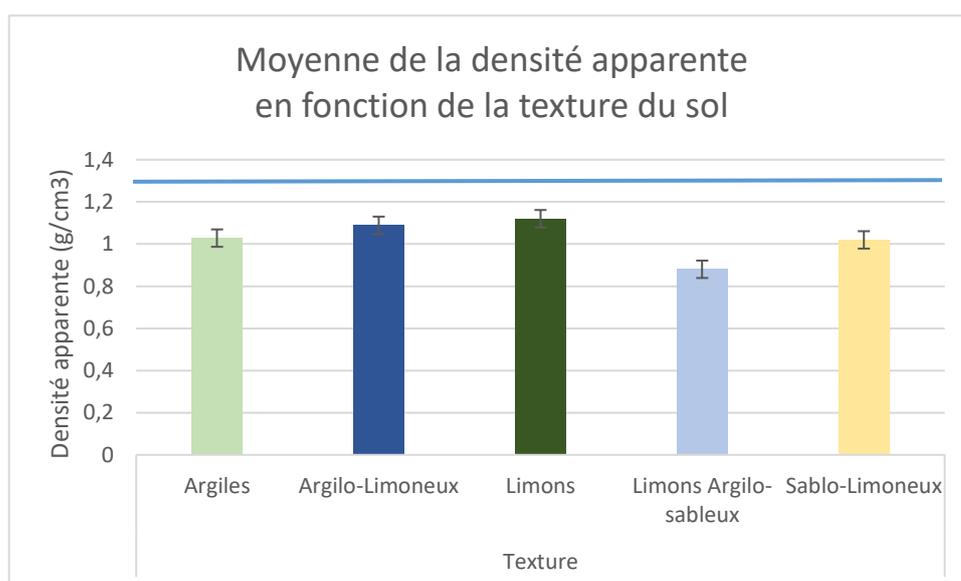


Figure 2: Densité apparente en fonction de la texture du sol (n=12)

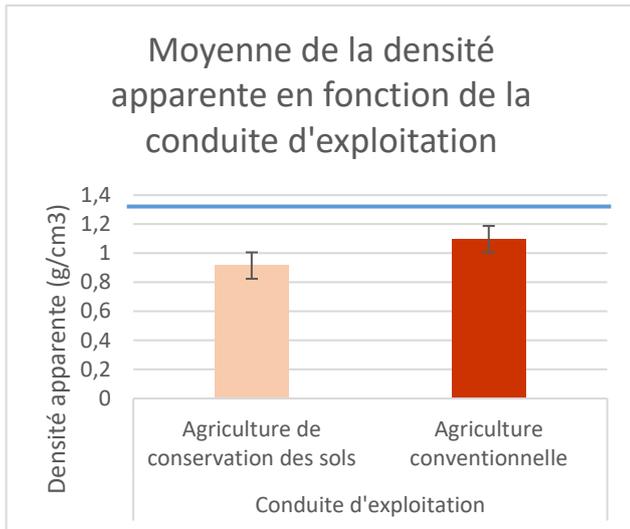


Figure 4: Densité apparente en fonction de la conduite d'exploitation (n=12)

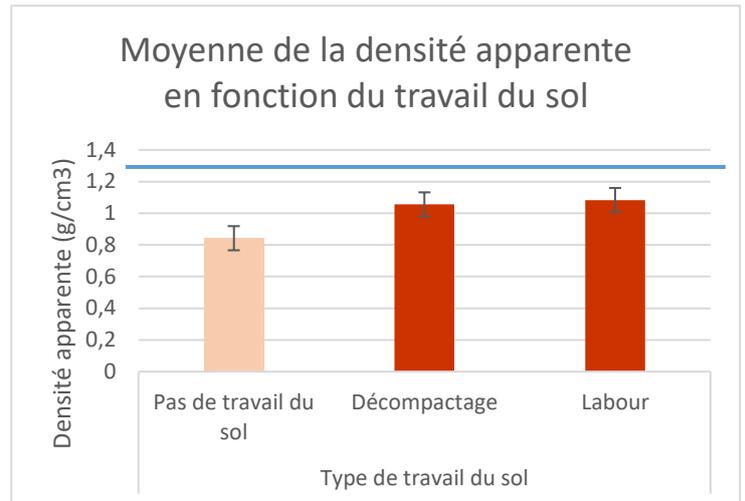


Figure 3: Densité apparente en fonction du type de travail du sol (n=12)

→ La densité apparente est plus faible en agriculture de conservation de sols et lorsqu'il n'y a pas de travail du sol

La conduite d'exploitation et le travail du sol étant liés nous y retrouvons les mêmes résultats.

Matière organique

La matière organique stocke et met à disposition les éléments nutritifs dont les plantes ont besoin. C'est également une source d'énergie pour les organismes du sol, stimulant ainsi leurs activités. De plus, elle joue un rôle positif sur la stabilité du sol ainsi que sur sa rétention d'eau. La matière organique est donc un élément très important du sol, l'idéal étant d'avoir au moins 2% de matière organique dans le sol.

Effet du digestat

Lecture graphique :

→ Il semble y avoir un taux de matière organique légèrement plus élevé sur les parcelles avec épandage de digestat. Cependant on observe une grande dispersion des données sur les parcelles sans digestat. Donc, la différence sur les teneurs moyennes de matière organique est à priori négligeable.

⇒ Test statistique utilisé : Kruskal-Wallis

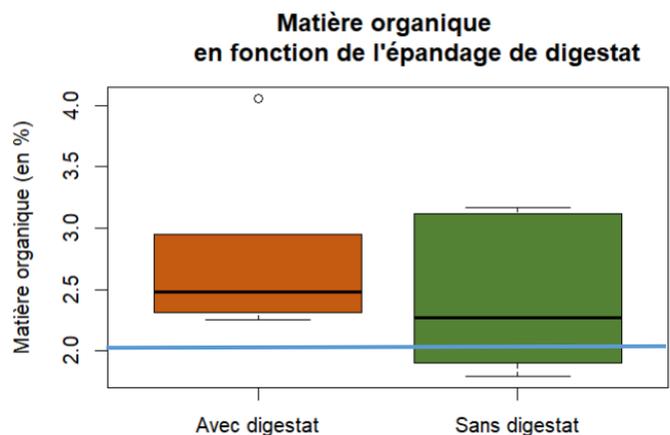


Figure 5: Teneur en matière organique en fonction de l'épandage de digestat (n=12)



Pas d'effet significatif du digestat sur la matière organique

Effet d'autres facteurs

La texture du sol, la conduite d'exploitation et le type de travail du sol sont en revanche des facteurs ayant un effet significatif sur la matière organique.

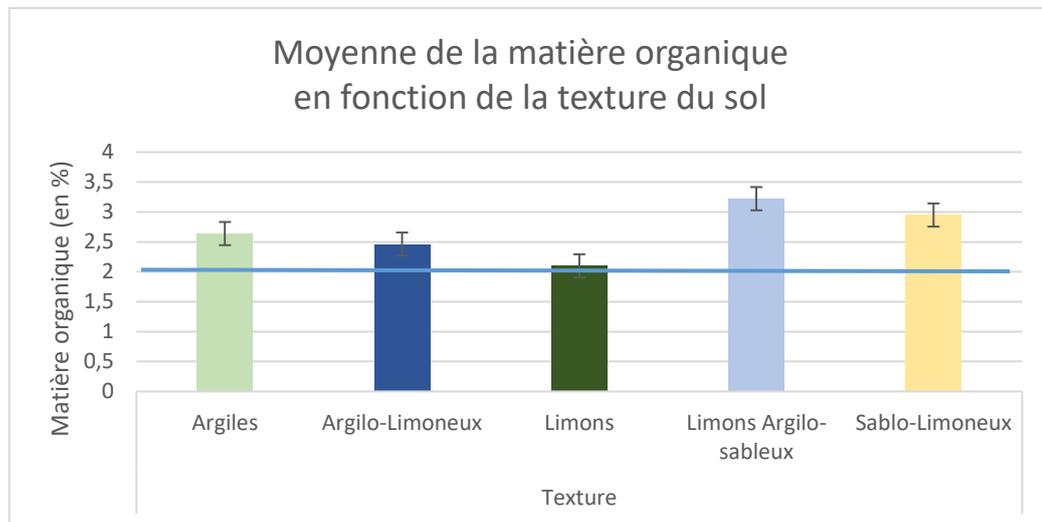


Figure 6: Teneur en matière organique en fonction de la texture du sol (n=12)

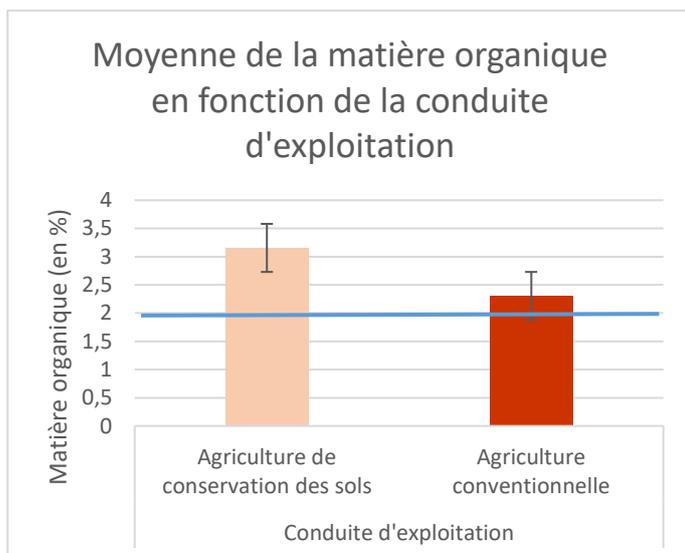


Figure 8: Teneur en matière organique en fonction de la conduite d'exploitation (n=12)

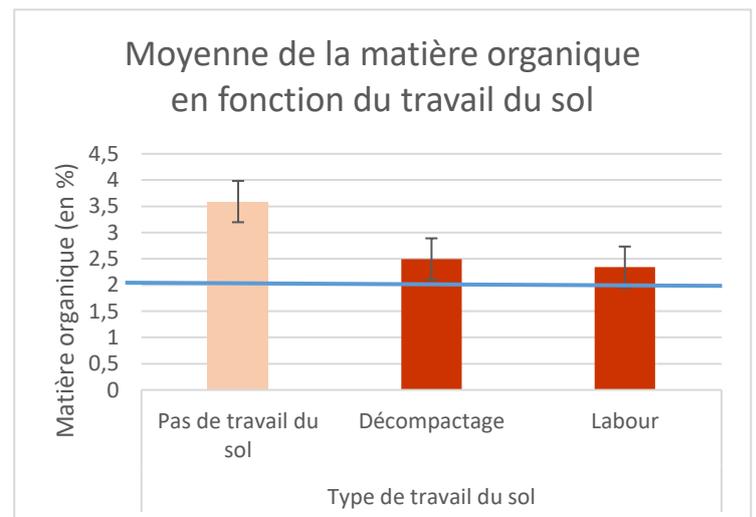


Figure 7: Teneur en matière organique en fonction du type de travail du sol (n=12)

La teneur en matière organique est significativement plus élevée lorsqu'il s'agit d'une agriculture de conservation et donc lorsqu'il y a une absence du travail du sol. Plus le travail du sol est profond et plus la teneur en matière organique diminue.

Cependant, il ne faut pas oublier que les échantillons ont été prélevés en surface du sol (dans les 15 premiers centimètres). Or, les résultats d'autres travaux indiquent que la suppression du travail du sol entraîne une augmentation de la matière organique en surface mais une diminution de cette matière en profondeur, là où un travail du sol vient homogénéiser la matière organique sur les différents horizons du sol (Perspectives Agricoles, p.467 Les indispensables, 2019).

Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique est un indicateur nous permettant de connaître la capacité du sol à fixer les cations (via le complexe argilo-humique) : le potassium, le magnésium, le calcium ou les ions ammonium, qui sont des éléments nutritifs pour les plantes. C'est pourquoi on cherche à avoir une CEC la plus importante possible. L'unité de la CEC est le nombre de charges cationiques, en milliéquivalents/Kg.

Effet du digestat

Lecture graphique :

→ La capacité d'échange cationique est identique qu'il y ait épandage de digestat ou non.

⇒ Test statistique utilisé : Kruskal-Wallis

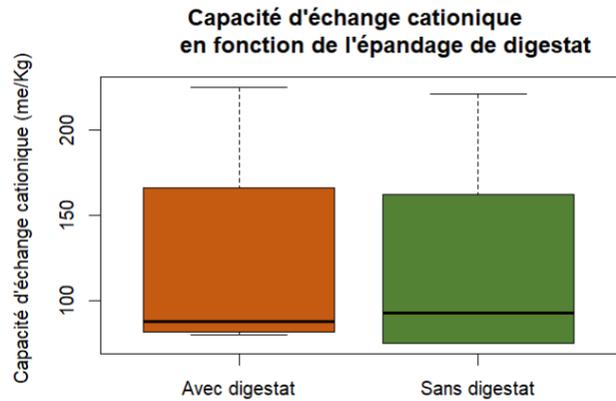


Figure 9: CEC Metson en fonction de l'épandage de digestat (n=12)



Pas d'effet significatif du digestat sur la capacité d'échange cationique

Effet d'autres facteurs

Quatre autres facteurs que le digestat ont un effet significatif sur la capacité d'échange cationique. Il s'agit de la texture du sol, de la conduite d'exploitation et du type de travail du sol ainsi que le pH.

Tout d'abord, les analyses statistiques ont démontré que la texture du sol et le pH ont un effet significatif sur la CEC. Plus la teneur en argile d'un sol et le pH du sol augmente et plus la capacité d'échange cationique est élevée, ce qui est en accord avec la littérature.

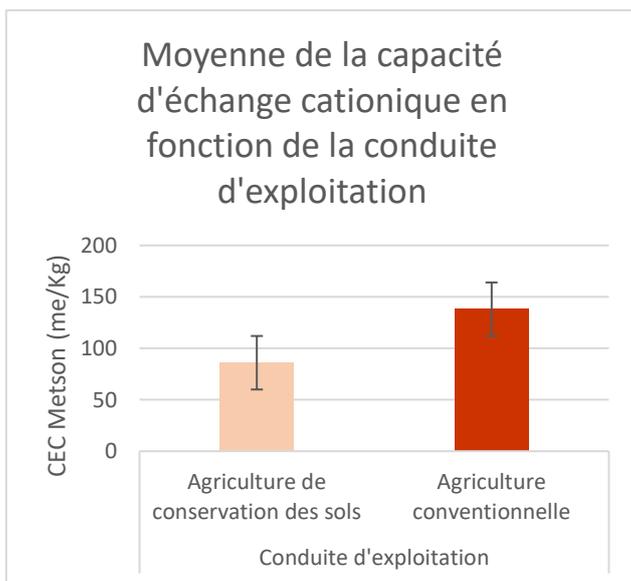


Figure 11: CEC Metson en fonction de la conduite d'exploitation (n=12)

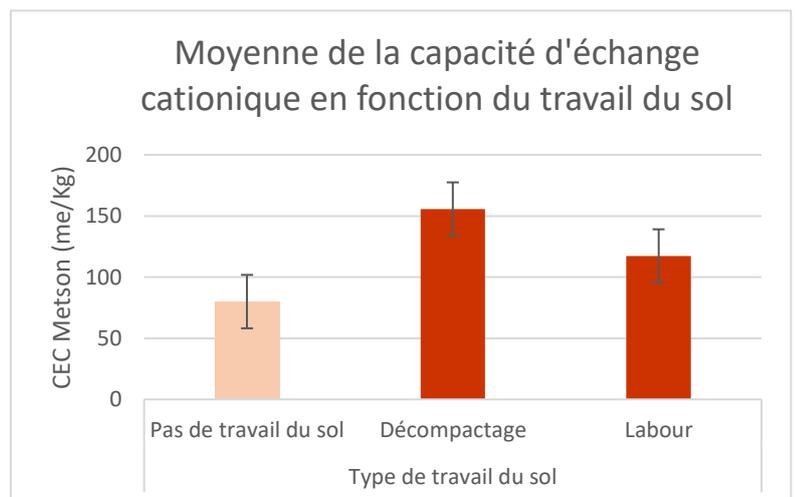


Figure 10: CEC Metson en fonction du type de travail du sol (n=12)

Le fait de ne pas travailler le sol diminue de moitié la capacité d'échange cationique par rapport au décompactage du sol. Ainsi la capacité d'échange cationique est plus faible avec une agriculture de conservation des sols qu'avec une agriculture conventionnelle.

Nous avons dans ce cas précis poussé les analyses statistiques un peu plus loin. En effet, si le fait qu'un sol argileux ait une capacité d'échange cationique plus élevée qu'un autre type de sol ou que la CEC évolue de la même manière qu'évolue le pH, ces deux faits sont accord avec la littérature. Il est plus surprenant de voir que le type de travail du sol ou la conduite d'exploitation du sol impacte cet indicateur. D'autant plus que d'après la littérature plus un sol est riche en matière organique et plus la CEC est élevée, or nous trouvons ici le contraire : la matière organique est plus élevée en absence de travail du sol, mais la CEC y est plus faible. C'est pour cela qu'une Anova de type II a été réalisée. Il s'agit d'un test statistique permettant de prendre en compte deux facteurs (ici, le pH et le travail du sol) et de regarder les effets simples (indépendamment de l'autre facteur) qu'ils ont sur la variable étudiée (ici CEC Metson). Afin de mieux comprendre les effets simples, voici une explication plus détaillée avec deux cas :

- 1^{er} cas : Le travail du sol a un effet sur la CEC. Donc on retire l'effet du travail du sol et on regarde l'effet du pH sur cette même variable. Dans notre cas, on observe que le pH a toujours un effet significatif sur la CEC même après avoir retiré l'effet du travail du sol.
- 2^{ème} cas : Il suffit d'inverser l'ordre des deux facteurs, avec un effet du pH sur la CEC. On retire donc cet effet et on regarde l'effet du travail du sol. Dans notre cas, après avoir retiré l'effet du pH sur la CEC, on observe que le travail du sol n'a plus d'effet significatif sur la CEC.

Si nous pouvons en conclure que le pH a bel et bien un effet significatif sur la capacité d'échange cationique, celui du travail du sol est plus discutable. Nous pouvons émettre l'hypothèse que l'effet du pH cache celui du travail du sol car celui-ci est plus grand et donc que l'effet du travail du sol est négligeable.

Biomasse Microbienne Carbonée (en % C/kg sol sec)

La biomasse microbienne carbonée représente la quantité de carbone présente dans les microorganismes du sol. Ces microorganismes sont indispensables à la vie biologique du sol car ils libèrent des enzymes et ainsi permettent la dégradation de la matière organique, qui sera transformée en éléments minéraux. Elle apporte donc des éléments nutritifs biodisponibles pour les plantes et assure la stabilité du carbone dans le sol.

Effet du digestat

Lecture graphique :

→ La biomasse microbienne carbonée semble plus élevée sans épandage de digestat que dans les parcelles avec digestat.

⇒ Test statistique utilisé : Kruskal-Wallis

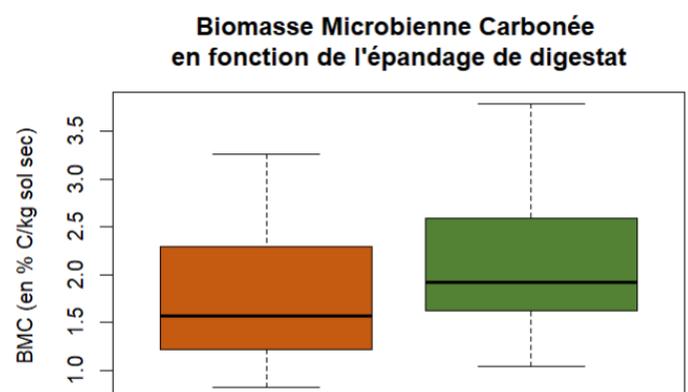
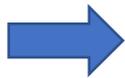


Figure 12: BMC en fonction de l'épandage de digestat (n=12)



Pas d'effet significatif du digestat sur la biomasse microbienne carbonée

Remarque : la p-value était très faible (à la limite du seuil de significativité).

Effet d'autres facteurs

Aucun des autres facteurs étudiés n'a d'effet significatif sur la biomasse microbienne carbonée.

Biomasse Microbienne Azotée

La biomasse microbienne azotée représente la quantité d'azote présente dans les microorganismes du sol.

Effet du digestat

Lecture graphique :

→ Il ne semble pas y avoir d'effet du digestat sur la biomasse microbienne azotée avec des biomasses relativement proches.

⇒ Test statistique utilisé : Kruskal-Wallis

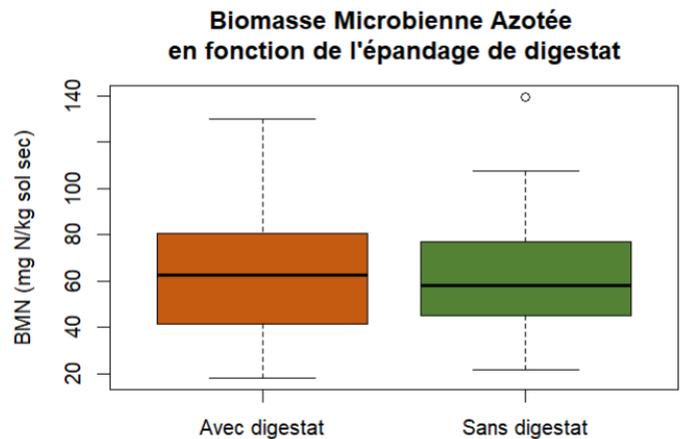


Figure 13: BMN en fonction de l'épandage de digestat (n=12)



Pas d'effet significatif du digestat sur la biomasse microbienne azotée

Effet d'autres facteurs

Seule la texture semble avoir un effet significatif parmi tous les facteurs étudiés.

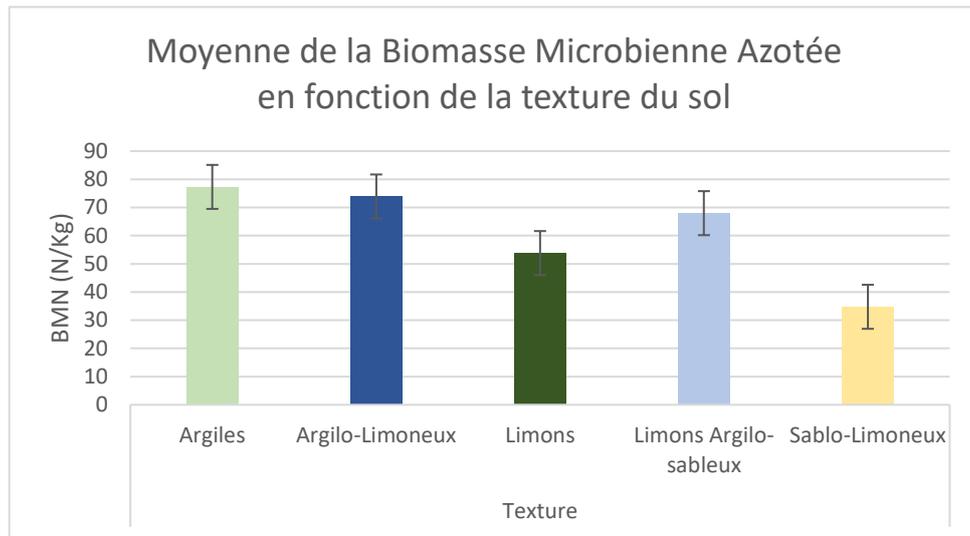


Figure 14: BMN en fonction de la texture du sol (n=12)

Les sols limoneux et sablo-limoneux ont une biomasse microbienne azotée nettement inférieure aux autres types de sol. Ces deux types de sols ont donc un effet significativement négatif sur la biomasse microbienne azotée.

Ratio Biomasse Microbienne Carbonée sur Biomasse Microbienne Azotée

Le ratio BMC/BMN est un indicateur de la proportion de bactéries et de champignons parmi les microorganismes du sol, les bactéries utilisant plus d'azote que de carbone par unité de biomasse. Ainsi, un ratio BMC/BMN élevé équivaut à une plus grande proportion de champignon dans le sol que de bactéries.

Effet du digestat

Lecture graphique :

→ Il n'y a pas de différence de ratio BMC/BMN en fonction de l'épandage de digestat.

⇒ Test statistique utilisé : Kruskal-Wallis

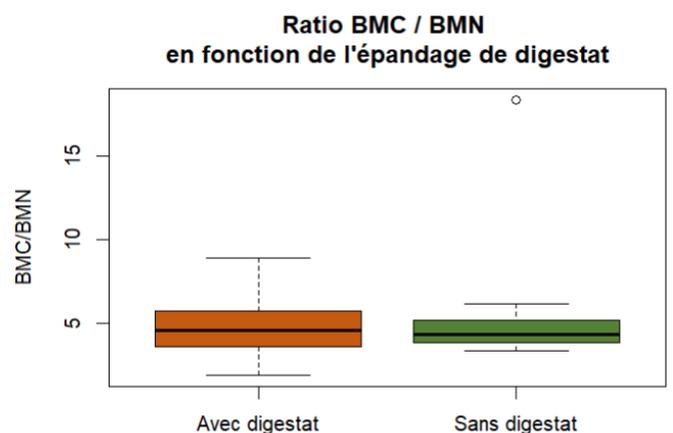
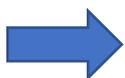


Figure 15: Ratio BMC/BMN en fonction de l'épandage de digestat (n=12)



Pas d'effet significatif du digestat sur le ratio BMC/BMN

Avec un ratio BMC/BMN assez faible, cela signifie qu'il y a plus de bactéries que de champignons dans les sols étudiés.

Effet d'autres facteurs

L'effet de la texture du sol et de la conduite d'exploitation sur le ratio BMC/BMN sont tous deux significatifs.

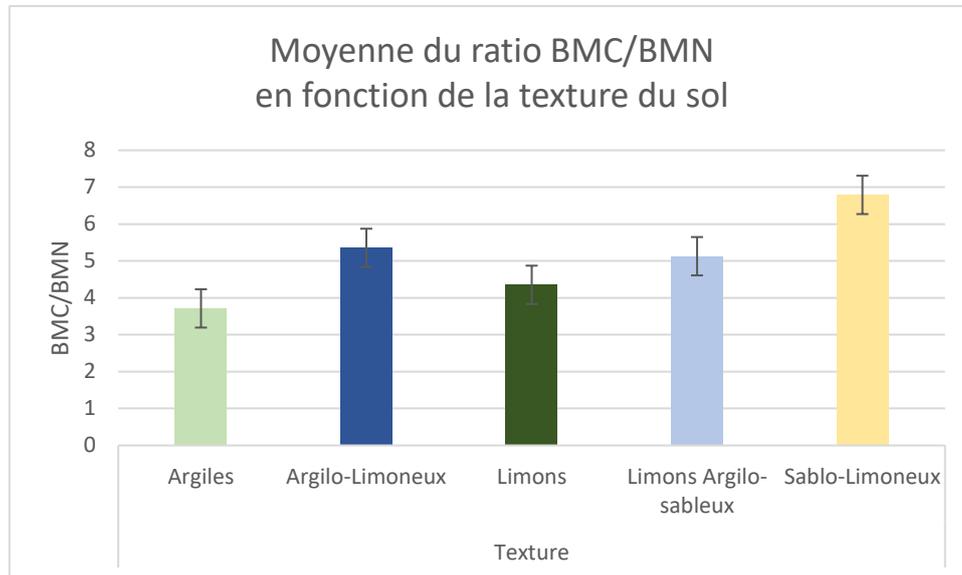


Figure 16: Ratio BMC/BMN en fonction de la texture du sol (n=12)

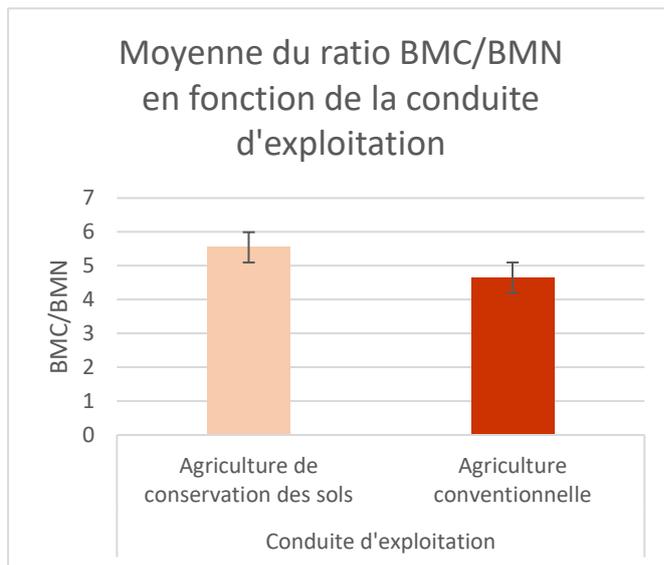


Figure 17: Ratio BMC/BMN en fonction de la conduite d'exploitation (n=12)

Le rapport BMC/BMN est plus élevé en agriculture de conservation des sols. Cela implique que la proportion de champignon est plus élevée en ACS qu'en agriculture conventionnelle.

Activité enzymatique

Abréviations	Nom de l'enzyme	Intervient dans la transformation	Intervient dans le cycle biogéochimiques
LAP	Leucine aminopeptidase	Protéine → acide aminé ($\Rightarrow \text{NO}_3^-$)	Azote
NAG	Nacétylglucosaminidase	Chitine → glucosamine ($\Rightarrow \text{NO}_3^-$)	Azote
BGLU	Betaglucosidase	Oligosaccharides → glucose	Carbone
ARS	Arylsulfatase	Ester (S) → Sulfate (SO_4^{2-})	Soufre
Phosph	Phosphatase	Ester (P) → Phosphate d'hydrogène (HPO_4^{2-})	Phosphore

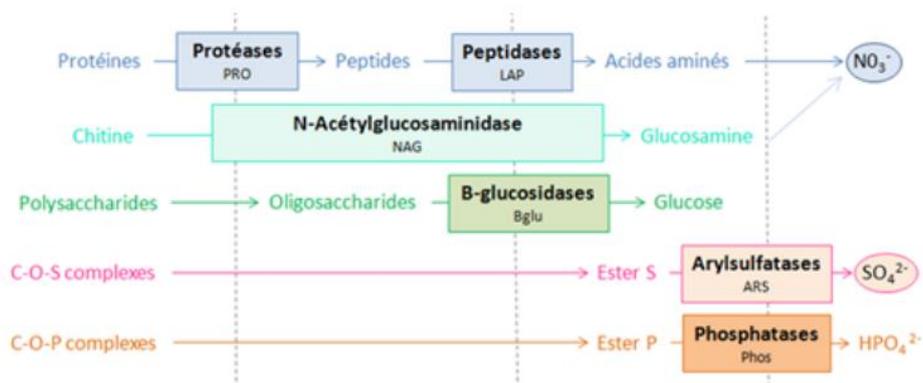


Figure 18: Schéma des voies de synthèse impliquant les enzymes étudiées (Source : Séverine Piutti, LAE – Université de Nancy)

Effet du digestat

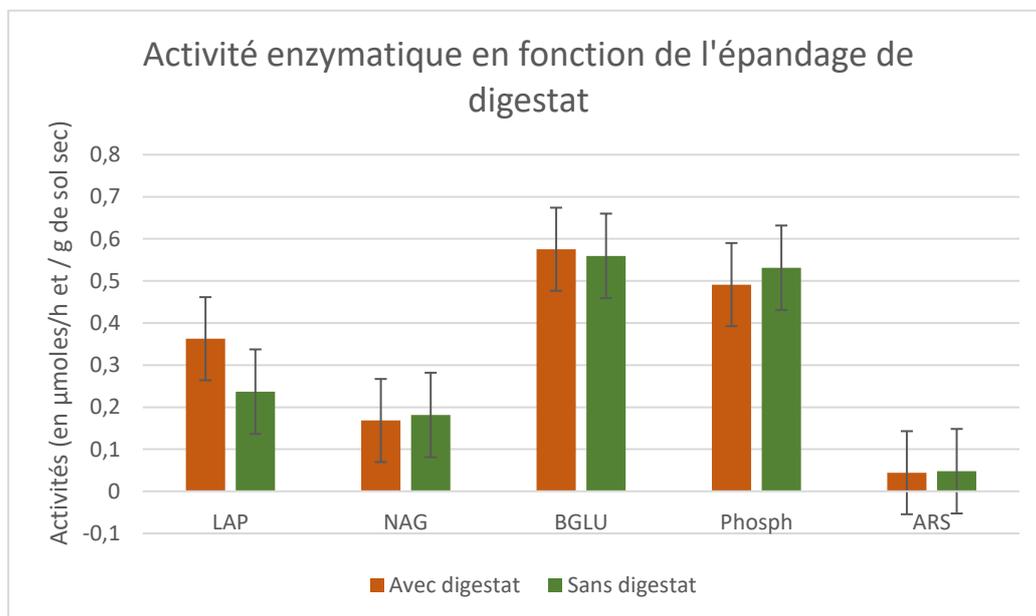


Figure 19: Activité enzymatique en fonction de l'épandage de digestat (n=12)

Il est possible d'observer une différence d'activité seulement avec l'enzyme LAP (Cycle de l'azote) avec la tendance d'un effet positif du digestat sur l'activité mesurée par cette enzyme.



Pas d'effet significatif du digestat sur l'activité enzymatique

Effets d'autres facteurs

La texture et le type de travail ont un effet significatif sur toutes les enzymes à l'exception de LAP. Le pH et la conduite d'exploitation ont un effet significatif sur toutes les enzymes à l'exception de deux d'entre elles : LAP et BGLU (cycle du carbone).

V. Résultats combinés des prélèvements 2020-2022

Dans cette partie, nous allons prendre en compte des parcelles issues de la phase 1, mais toutes les parcelles ne seront pas prises en compte. En effet, nous avons sélectionnées les parcelles étant les plus semblables entre elles afin d'éviter d'introduire un biais dans les résultats. Parmi celles étudiées dans la partie précédente, celles de la ferme D ont été enlevées à cause de la parcelle sans digestat qui était une prairie l'année dernière. Sur les parcelles prélevées en 2020, seules celles issues de trois fermes ont été sélectionnées.

Présentation des nouvelles exploitations agricoles

- Ferme F

Il s'agit d'une exploitation agricole spécialisée dans l'élevage de porcins située dans le département de l'Aisne (02). La mise en service de l'unité de méthanisation date de l'année 2015 avec une ration composée à 64% d'effluents de lisiers, 2% d'effluents de fumiers et 34% d'effluents de matières végétales.

Sur ce site, les parcelles ont été prélevées le 5 novembre 2020 (en période de gel).

		Parcelle sans digestat	Parcelle avec digestat
<i>Ferme F</i>	Occupation du sol	Oignon	Canne de maïs
	Rotation	Oignon-Maïs-Blé-BS*	Maïs-Blé-BS*
	Texture du sol	Argilo-Limoneux	Argilo-Limoneux
	pH du sol	7,7	7,6
	Travail du sol	Labour	Labour
	Autres produits organiques	Aucun	Aucun

* Betterave Sucrière

- Ferme G

Il s'agit d'une exploitation agricole située dans le département de la Moselle (57). La mise en service de l'unité de méthanisation date de l'année 2017 avec une ration composée à 100% d'effluents de matières végétales.

Sur ce site, les parcelles ont été prélevées le 12 novembre 2020 (conditions climatiques normales).

		Parcelle sans digestat	Parcelle avec digestat
<i>Ferme G</i>	Occupation du sol	Blé	Sol nu (temporaire)
	Rotation	Colza-Blé-Maïs-Maïs-Orge	Colza-Blé-Maïs-Maïs-Orge
	Texture du sol	Argiles	Argiles
	pH du sol	7,8	8,1
	Travail du sol	TCS**	TCS**
	Autres produits organiques	NA	NA

**** Technique Culturelle Simplifiée**

- Ferme H

Il s'agit d'une exploitation agricole spécialisée dans les bovins lait située dans le département de Meurthe-et-Moselle (54). La mise en service de l'unité de méthanisation date de l'année 2014 avec une ration composée à 58% d'effluents de fumiers et 42% d'effluents de matières végétales

Sur ce site, les parcelles ont été prélevées le 15 octobre 2020 (conditions climatiques normales).

		Parcelle sans digestat	Parcelle avec digestat
<i>Ferme H</i>	Occupation du sol	Sol nu (temporaire)	Sol nu (temporaire)
	Rotation	Blé-Maïs-Tournesol	Blé-Maïs-Tournesol
	Texture du sol	Argilo-Limoneux	Argilo-Limoneux
	pH du sol	7,8	7,9
	Travail du sol	Déchaumage	Déchaumage
	Autres produits organiques	Aucun	Aucun

Effet du digestat

Les analyses statistiques faites avec les fermes sélectionnées sont en parfait accord avec les résultats trouvés précédemment. L'effet du digestat n'a pas été étudié sur la densité apparente du sol étant donné que nous ne possédons pas de nouvelles valeurs à analyser sur les parcelles prélevées les années précédentes. Nous nous sommes donc exclusivement intéressés à l'effet du digestat sur la matière organique, la capacité d'échange cationique, la biomasse microbienne carbonée et azotée ainsi qu'au rapport de la BMC sur la BMN. Aucune tendance sur l'effet du digestat n'est observée sur ces indicateurs (graphique 20), à l'exception de la CEC qui semble légèrement supérieure avec la présence de digestat.

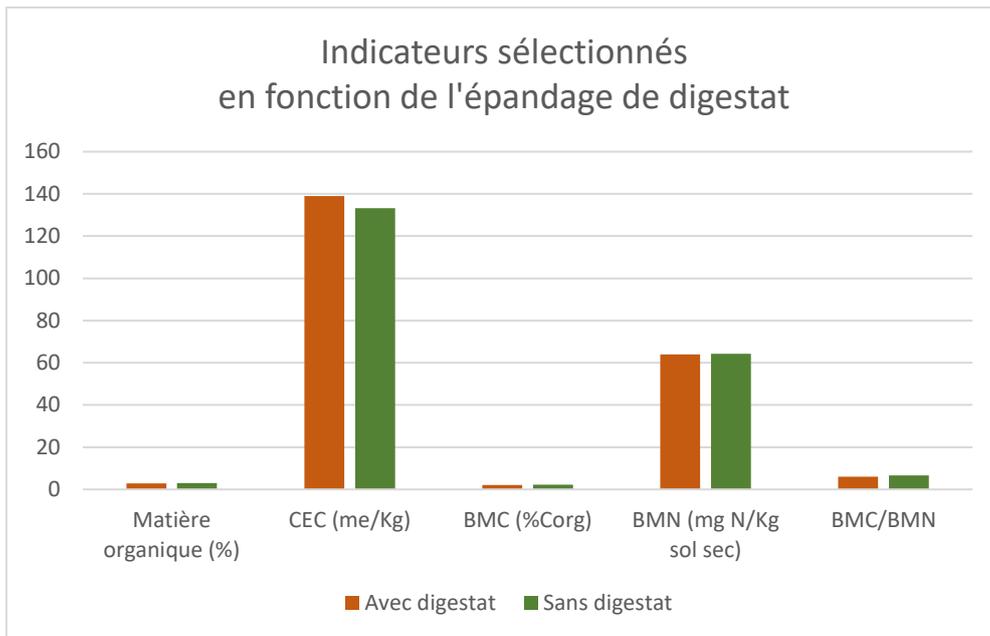


Figure 20: Indicateurs sélectionnés en fonction de l'épandage de digestat (n=16)

Lors des analyses statistiques, des tests de Kruskal-Wallis ont été utilisés et aucun effet significatif du digestat n'a été démontré. Si sur les prélèvements faits cette année, nous avons un résultat proche du seuil de significativité pour la biomasse microbienne carbonée, nous obtenons cette fois-ci un résultat nettement non significatif.

VI. Synthèse des résultats

Les résultats obtenus suite à une nouvelle campagne de prélèvements plus rigoureuse que les années précédentes ont démontré que le digestat n'a pas d'effet significatif sur les indicateurs que nous avons sélectionnés. Mais ces indicateurs sont en revanche impactés par d'autres facteurs.

Indicateurs	Facteurs ayant un effet significatif	Interprétation et commentaire
Densité apparente & Matière Organique	Texture	Les sols où l'on pratique l'ACS et où il n'y a pas de travail du sol ont une densité apparente significativement plus basse, mais ont une teneur en matière organique significativement plus élevée qu'avec d'autres pratiques (la matière organique est également influencée par la teneur en argile d'un sol, il se peut donc que la texture est un effet plus fort que les autres facteurs).
	Conduite d'exploitation	
	Travail du sol	
Capacité d'Echange Cationique	Texture	La CEC est impacté par la texture et le pH. Les analyses statistiques ont révélé que le travail du sol avait un effet négligeable par rapport à l'effet du pH. La texture du sol et le pH sont les facteurs qui impactent le plus la CEC et ce sont les sols argileux et les sols avec un pH basique qui ont les meilleures CEC.
	Conduite d'exploitation	
	Travail du sol	
	pH	
BMN	Texture	La BMN est influencé différemment en fonction du groupe de parcelles étudiées. D'un côté seule la texture a un effet significatif sur la BMN (lorsque n=12) et d'un autre côté il y a un effet significatif de la texture et du travail du sol (lorsque n=16).
	Travail du sol	
BMC	Conduite d'exploitation	La BMC est influencé différemment en fonction du groupe de parcelles étudiées. D'un côté nous avons une p-value à la limite du seuil de significativité pour l'effet du digestat et aucun autre facteur étudié n'a d'effet significatif sur la BMC (lorsque n=12). D'un autre côté, il y a un effet du digestat qui est nettement non significatif mais avec un effet significatif de la conduite d'exploitation et du travail du sol (lorsque n=16).
	Travail du sol	
BMC/BMN	Texture	Pour rappel, si la valeur de ce rapport est élevée cela revient à dire qu'il y a plus de champignons que de bactéries dans le sol. Dans tous les cas, les valeurs sont assez faibles et il y a donc plus de bactéries que de champignons dans les sols. Mais avec un rapport BMC/BMN plus élevé en ACS, cela revient à dire que le sols soumis à cette pratique a une proportion de champignon plus élevée que dans les sols soumis à une autre pratique agricole.
	Conduite d'exploitation	

Concernant les résultats de la BMN et BMC, les résultats avec 16 parcelles sont ceux à privilégier puisque ce sont ceux qui ont été le moins biaisés avec une sélection des parcelles les plus comparables.

A noter que les résultats d'une première étude avaient montré un effet significativement négatif du digestat sur la BMC. Il semble pertinent de privilégier les résultats obtenus avec les 16 parcelles

indiquant un effet non significatif du digestat sur la BMC, car le choix des parcelles a été plus rigoureux que lors de la première phase de travaux.

La texture est le facteur ayant un effet significatif sur beaucoup d'indicateurs. Ce qui n'est pas surprenant puisque chaque type de sol a ses propriétés qui lui sont propres, il est donc logique que ce facteur impacte fortement les indicateurs de la qualité d'un sol. Ainsi, la texture a peut-être un effet supérieur à d'autres facteurs étant donné que les sols sont très différents entre eux.

VII. Discussion

Le premier but de ce travail est d'observer l'effet du digestat sur la qualité des sols. **Or sur tous les indicateurs étudiés les résultats sont les mêmes, nous n'observons pas d'effet significatif du digestat, qu'il soit positif ou négatif.** Il aurait été également pertinent d'étudier l'effet de la texture par rapport d'autres facteurs notamment sur la matière organique et la CEC qui sont influencées par la teneur en argile d'un sol.

Il est important de préciser que le choix des parcelles est très important. Cette campagne de prélèvements a été plus rigoureuse sur ce point, une seule des parcelles ne correspondait pas bien aux critères de sélection avec la présence d'une ancienne prairie permanente, dont l'effet est plus fort que celui du digestat. Avec ce choix plus rigoureux, nous avons obtenu un résultat différent des précédents travaux, ce qui démontre l'importance de cette étape.

De plus, le biais de la variabilité humaine a été largement réduit avec des parcelles échantillonnées par une seule et même personne.

Cependant, malgré une sélection de parcelles méticuleuse, les résultats ont été obtenus sur peu de données et le test statistique qui a été majoritairement utilisé est un test non paramétrique. Pour améliorer la précision de ces tests, il faudrait enrichir la base de données avec plus de prélèvements afin de pouvoir faire des tests paramétriques, ce qui permettrait d'avoir des résultats plus représentatifs.

VIII. Conclusion

La deuxième phase du projet de l'AAMF est maintenant clôturée. L'un des premiers points qui était à améliorer par rapport aux travaux de la phase 1 était une meilleure sélection des parcelles. De manière générale, la sélection des parcelles a été plutôt réussie. Concernant les indicateurs sélectionnés, un n'a pas pu être réalisé du fait de la météo avec des prélèvements réalisés en période de sécheresse. Il s'agit des prélèvements de vers de terre, un indicateur dont l'étude mériterait d'être approfondie au vu des résultats obtenus lors de la phase 1.

La problématique de ce rapport concernait les craintes sur la qualité et la fertilité des sols quant à l'utilisation du digestat. Sur ce point, les résultats indiquent qu'il n'y a pas d'effet significatif du digestat. Et ces résultats confirment ceux trouvés en phase 1, hormis pour la biomasse microbienne carbonée. A ce stade du projet et n'ayant pas encore d'autres projets auxquels se référer, nous pouvons en conclure que l'utilisation du digestat n'altère pas la qualité et la fertilité des sols.

Concernant les effets des autres facteurs étudiés sur la qualité des sols, le premier des facteurs étudié est la texture même du sol c'est un facteur qui influence beaucoup les différents éléments du sol et qui évidemment ne se contrôle pas. L'effet de la conduite d'exploitation et du travail du sol ont également été étudié, et ces facteurs font un peu débats. Que ce soit une agriculture conventionnelle, raisonnée ou de conservation des sols chacune de ces pratiques ont leurs avantages et leurs inconvénients, elles ont des effets positifs et négatifs en fonction des indicateurs étudiés. Il en est de même sur la question du type de travail du sol. Sur ces deux facteurs, il n'y a pas de tendance d'une conduite ou d'un type de travail du sol qui aurait un effet plus positif que les autres sur les indicateurs étudiés.

Pour aller plus loin dans ce projet, enrichir la base de données avec une sélection rigoureuse des parcelles semble une bonne option. En effet, plus il y aura de données et plus elles seront représentatives de la réalité et plus les analyses statistiques seront robustes. Il serait également vraiment intéressant d'obtenir des résultats sur la faune du sol afin de les comparer avec ceux obtenus en phase 1. Il me semble aussi pertinent de continuer à étudier les biomasses microbiennes puisque les résultats obtenus sont différents entre la phase 1 et la phase 2.

Une autre solution pour enrichir la base de données serait un projet de sciences participatives sur l'observation des vers de terre par exemple. Seulement, cela demande du temps aux agriculteurs de devoir aller observer les vers de terre puis de reconnaître leurs groupes fonctionnels. Il existe peut-être des solutions numériques avec des applications qui pourraient rendre ce travail plus rapide et plus accessible à condition d'être à l'aise avec des outils numériques.

De plus en plus de projets émergent sur l'utilisation du digestat sur la qualité des sols, notamment celui de MéthaBioSol. Des projets comme celui-ci sont vraiment intéressants car sont faits avec plus de moyens financiers et à plus grande échelle sur le territoire. Donc comparer les résultats obtenus avec le projet de l'AAMF et avec ceux obtenus par MéthaBioSol nous permettrait de juger de la qualité de notre travail et de savoir s'il est représentatif de la réalité.

IX. Bibliographie

Anne Mazzoni, 2021. « Impacts de l'épandage du digestat de méthanisation sur la qualité des sols », AAMF.

Anne Mazzoni, 2021. « Synthèse des indicateurs et protocoles », AAMF.

IDYST – Institut des dynamiques de la surface terrestre. « Détermination de masse volumique apparente », UNIL – Université de Lausanne. [Détermination masse volumique apparente.pdf \(unil.ch\)](#)

Direction du Développement Rural de la province Sud. « Rôles, objectifs du travail du sol et modes d'actions des outils ». [Rôles, objectifs du travail du sol et modes d'actions des outils.pdf \(province-sud.nc\)](#)

« Effets du travail du sol », Agronomie. [Consulté le 22/08/2022]. [Effets du travail du sol - Agronomie](#)

Fleur Olganier, 2022. « Comment l'agriculture de conservation peut améliorer la qualité des sols ? », INRAE. [Comment l'agriculture de conservation peut améliorer la qualité des sols ? | INRAE INSTIT](#)

Perspectives Agricoles, p.467 Les indispensables, 2019. Essai « Travail du sol » à Boigneville. [pa467-indispensables-travail-du-sol7280256155598986129.pdf \(arvalisinstitutduvegetal.fr\)](#)

Jean Roger-Estrade, Professeur d'Agronomie à AgroParisTech, 2014. « Travail ou non travail du sol ? Question pour une agriculture plus durable ». [Consulté le 24/08/2022]. [Travail ou non travail du sol? Question pour une agriculture plus durable \(huffingtonpost.fr\)](#)

Chambre d'agriculture Occitanie, 2011. « Les matières organiques du sol », Les produits organiques utilisables en Languedoc-Roussillon – Tome 1, Chapitre 2. [Tome1.pdf \(chambre-agriculture.fr\)](#)

Chambre d'agriculture de la Drôme – Tech et Bio, 2015. « La capacité d'échange cationique ». [Fiche_CEC.pdf \(agriressources.fr\)](#)

X. Annexes

Les protocoles de prélèvements :

- Biomasse microbienne, activité enzymatique / Profil agronomique du sol : Faire un trou avec la tarière et récupérer environ 200g de terre pour la biomasse microbienne et l'activité enzymatique et entre 500 et 1000g de terre pour l'analyse du profil agronomique du sol.
- Densité apparente : Faire un trou à l'aide de la bêche sur hauteur de bêche. Enfoncer latéralement et délicatement (pour éviter tout tassement du sol) le cylindre sur le côté le moins lissé par la bêche. Une fois le cylindre complètement enfoncé, dégager la terre à l'aide d'un couteau pour récupérer le cylindre et ce qu'il contient. Enlever le surplus de terre à chaque extrémité du cylindre, puis mettre la terre dans un sachet (si terre trop compact → la pousser délicatement dans le sachet en évitant le maximum tout tassement).
- Texture (test du Bocal) : Choisir un bocal transparent. Prélever la terre à 10 cm de profondeur et remplir le bocal à moitié puis compléter avec de l'eau et agiter fortement pendant 3 minutes. Laisser reposer 30 minutes puis agiter de nouveau pendant 3 minutes. Laisser de nouveau reposer (24h max.) puis mesurer l'épaisseur de chaque fraction (cf. dessin). Déterminer ensuite le pourcentage d'argile, de limons et de sable pour établir la texture du sol à l'aide de la pyramide de texture.

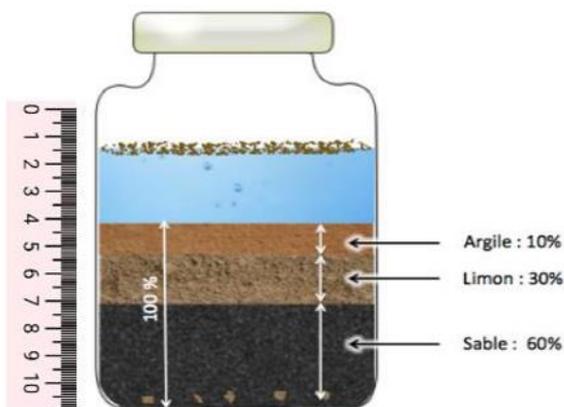


Figure 212: Mazzoni, 2021, « Synthèse des indicateurs et protocoles », p.8

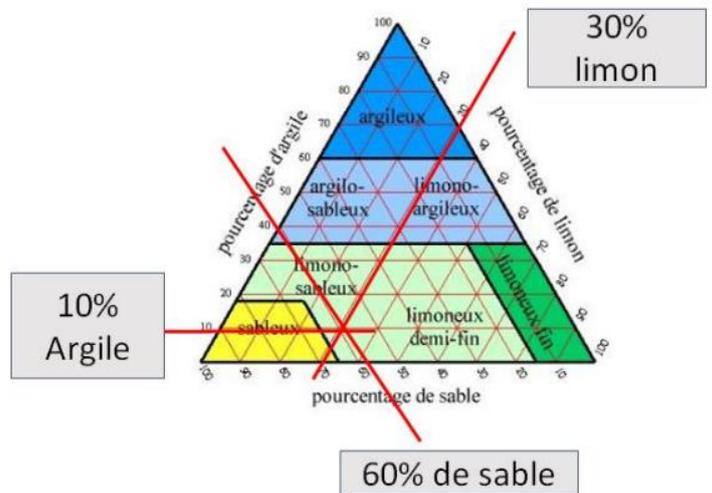


Figure 23: Mazzoni, 2021, « Synthèse des indicateurs et protocoles », p.8