

Metha-BioSol : Impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles

Sophie SADET-BOURGETEAU¹, Daniela MORA-SALGUERO¹, Camille CHAUVIN², Pierre BARRE³, Daniel CLUZEAU⁴, Pascal PIVETEAU⁵, Cécile VILLENAVE², Anne HERMANT⁶, Aurélie SCHERER⁶, Virginie RIOU⁷, Mariana MOREIRA⁸, Kevin HOFFNER⁴, Adeline HAUMONT⁹, Gregory VRIGNAUD¹⁰, Vincent JEAN-BAPTISTE¹¹, Thierry MORVAN¹², Manon GILLES¹³, Arthur BAILLY¹, Margaret JOHNSON¹⁴, Véronique STANGRET¹⁴, Aurélie LEVET¹⁵, Aurélie REIBEL¹⁵, Samuel DEQUIEDT¹, Pierre-Alain MARON¹, Julie TRIPIED¹, Lionel RANJARD¹, Pierre MULLIEZ⁷, Mario CANNAVACCIUOLO¹⁶

¹ Université de Bourgogne Europe, Institut Agro Dijon, INRAE, UMR Agroécologie, 21000 Dijon, France

² ELISOL Environnement, 30111 Congénies, France

³ Laboratoire de Géologie, Ecole normale supérieure, CNRS, PSL Univ., IPSL, 75005 Paris, France

⁴ Université de Rennes, CNRS, ECOBIO - UMR 6553, 35000 Rennes, France

⁵ INRAE, UR OPALE, 35000 Rennes, France

⁶ Chambre d'agriculture de Côte d'Or, 21110 Bretenière, France

⁷ Chambre régionale d'agriculture des Pays de la Loire, 49105 Angers, France

⁸ Chambre d'agriculture de région Bretagne, 35000 Rennes, France

⁹ Association AILE, 44939 Nantes, France

¹⁰ ACE méthanisation, 79100 Thouars, France

¹¹ GRDF, 75009 Paris, France

¹² INRAE, UMR Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, 35000 Rennes, France

¹³ INRAE, UE 0871 Service d'expérimentation Agronomique et Viticole, 68000 Colmar, France

¹⁴ Etablissement public local d'enseignement et de formation professionnelle agricoles (EPLEFPA) du Bas-Rhin, 67348 Obernai, France

¹⁵ Association GERES, 13400 Aubagne, France

¹⁶ USC 1432 LEVA, Ecole Supérieure d'Agricultures (ESA), INRAE, 49007 Angers, France

Correspondance : sophie.bourgeteau-sadet@agrosupdijon.fr

Résumé :

Le projet Metha-BioSol a pour objectif d'évaluer l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique et écologique des sols en utilisant un tableau de bord d'indicateurs opérationnels. Ce tableau de bord inclut des mesures de l'état physique et chimique du sol, des bio-indicateurs des communautés biologiques du sol et des indicateurs du fonctionnement biologique du sol et de l'état sanitaire des sols. Le projet était constitué de deux parties : 1) Evaluer, en conditions contrôlées, l'impact du type de digestats en tenant compte du type de sol, et sur des sites expérimentaux, l'impact de la répétition dans le temps des apports de digestat ; et 2) Mettre en place un réseau national de fermes agricoles et effectuer un diagnostic de l'impact de l'apport de digestats associé à diverses pratiques agronomiques et dans des contextes pédoclimatiques variés. Les résultats obtenus en conditions contrôlées et sur sites expérimentaux ont permis de montrer que la réponse des bio-indicateurs à un apport de digestat était dépendante du type de digestat, du contexte pédoclimatique, et de la récurrence de ces apports. La mise



en place du réseau de fermes a permis de générer les premiers éléments d'un référentiel d'interprétation de l'impact de l'utilisation des digestats dans des contextes territoriaux et sociotechniques variés.

Mots-clés : digestat, biologie du sol, bio-indicateurs, diagnostic, agriculture

Abstract: Metha-BioSol: Impact of Anaerobic Digestate on the Biological Quality of Agricultural Soils

The Metha-BioSol project aims to assess the impact of anaerobic digestion residues (digestates) on the biological and ecological quality of soils using an operational dashboard of indicators. This dashboard includes measurements of soil physical and chemical status, bio-indicators of soil biological communities and indicators of soil biological functions and soil health status. The project consisted of two parts: 1) To evaluate, under controlled conditions, the impact of different types of digestates taking into account the soil type, and on experimental sites, the impact of repeated digestate applications; and 2) To establish a national network of agricultural farms and conduct an assessment of the impact of digestate application combined with various agronomic practices in different pedoclimatic contexts. The results obtained from both controlled conditions and experimental sites showed that the response of bio-indicators to digestate application was dependent on the type of digestate, the pedoclimatic context, and the recurrence of these applications. The establishment of the farm network also provided the first elements for creating a reference framework for interpreting the impact of digestate use in varied territorial and sociotechnical contexts.

Keywords: digestate, soil biology, bio-indicators, diagnosis, agriculture

1. Introduction

La méthanisation est une technologie basée sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène. Cette dégradation aboutit à la production 1) d'un biogaz, le méthane, utilisé comme énergie renouvelable et 2) d'un produit contenant de la matière organique et des éléments nutritifs appelés digestat. Ce digestat est retourné au sol en tant que fertilisant organique soit sous forme brute, ou bien, après séparation de phase, sous forme liquide ou solide. La fraction solide du digestat est réputée pour son contenu élevé en matière organique présentant une grande proportion de carbone stabilisé. La fraction liquide, quant à elle, se caractérise, en comparaison avec la phase solide, par une teneur en azote minéral soluble plus importante, une teneur plus faible en matière organique et la présence de fractions organiques plus labiles (jusqu'à 90 % de minéralisation du carbone organique). Ces caractéristiques lui confèrent ainsi une valeur fertilisante supérieure au digestat brut. L'infiltration de cette fraction liquide dans le sol est plus rapide, en raison de sa teneur affaiblie en matière sèche (Reibel, 2018). D'un point de vue réglementaire, en application des articles L. 255-1 et s. et R. 255-29 du Code rural et de la pêche maritime, un cahier des charges « Pour la mise sur le marché et l'utilisation de digestats de méthanisation d'intrants agricoles et ou agro-alimentaires en tant que matières fertilisantes » (Cahier des charges Dig du 22 octobre 2020) vise à garantir une qualité des digestats conforme aux critères qu'ils énoncent et à faciliter leur utilisation agricole hors plan d'épandage. Par défaut et dans leur grande majorité, les digestats sont sous statut de déchet et épandus dans le cadre de plans d'épandage.

Le type de carbone (stable, labile) apporté au champ par les digestats de méthanisation pose question. En effet, son devenir (stockage et/ou émission de gaz à effet de serre...) est fortement dépendant des organismes décomposeurs du sol. Par ailleurs, il est également important d'évaluer l'impact de cette pratique agricole sur la diversité des organismes du sol afin de garantir un fonctionnement optimal du sol (dynamique des matières organiques et cycles du carbone et de l'azote, bio-disponibilité des éléments nutritifs, dégradation de polluants organiques, rétention de polluants métalliques, action sur la structure des sols, etc.). Concernant la biologie des sols, les données scientifiques disponibles ne permettent pas



d'objectiver l'impact des digestats de méthanisation. En effet, les dispositifs expérimentaux sont multiples, tant sur le type de digestats apporté, le type de sol étudié que sur les fréquences ou conditions d'apport. Une méta-analyse récente rapporte néanmoins que les digestats de méthanisation auraient un effet neutre sur la qualité microbiologique du sol dans 50 % des cas ; des effets négatifs, eux, seraient observés dans 7 % des cas. Cette méta-analyse soulève également l'insuffisance des données générées à ce jour pour évaluer l'impact des digestats sur le long terme. Ces conclusions ne permettent pas de statuer quant à l'absence de risque écologique des digestats sur la qualité microbiologique des sols (Karimi *et al.*, 2022). Concernant l'impact des digestats sur la macrofaune du sol, peu de données sont actuellement disponibles dans la littérature scientifique. Il semble cependant que l'apport de digestat induise une augmentation de la biomasse et de l'abondance des vers de terre au niveau des sols agricoles (Koblenz *et al.*, 2015). A notre connaissance, l'impact de telles pratiques sur le long terme n'a pas été étudié. De même, l'ensemble des résultats générés apparaît dépendant du type de digestat épandu et du type de sol, rendant les conclusions actuelles peu génériques.

Parallèlement à cette littérature scientifique, plusieurs rapports ont été rédigés par des associations ou des groupes de travail. Dans ces documents, l'impact des digestats sur la biologie du sol est également décrit, voire décrié. Ainsi, il est recensé que l'apport de digestats solides induit une diminution de la vie des sols (MethaLAE-CASDAR, 2018). Les digestats liquides, eux, auraient tendance à avoir le même effet sur la biologie du sol qu'une fertilisation chimique. Concernant plus spécifiquement les vers de terre, les conclusions sont variables. Certains rapports montrent un effet positif des digestats sur les lombrics ainsi que sur les acariens et les collemboles (Burmeister *et al.*, 2015). D'autres documents sont plus mitigés, notamment celui de l'ANSES qui démontre un impact négatif des digestats sur la reproduction des vers de terre (ANSES, 2018). D'autre part, à notre connaissance, hormis le projet Metha-BioSol, il n'existe pas d'études (scientifiques et non scientifiques) évaluant à la fois l'impact des digestats et des pratiques associées (types de digestats, itinéraires techniques, systèmes de cultures, etc...) sur la qualité biologique des sols. Ainsi, le peu de résultats disponibles dans la littérature est non seulement contradictoire, mais également non représentatif de la réalité de terrain en omettant une approche systémique de la problématique.

Le principal objectif du projet Metha-BioSol était d'aider les agriculteurs à évaluer l'impact de la valorisation agronomique de digestats de méthanisation sur la qualité biologique de leur sol *via* des outils opérationnels de type bio-indicateurs. *In fine*, cela devait leur permettre de mieux appréhender les impacts environnementaux de ces pratiques et ainsi la durabilité de leurs systèmes de productions. Cet objectif principal, se déclinait en trois sous-objectifs :

- Générer des données scientifiques manquantes sur l'impact à court (*via* la mise en place d'essais en conditions contrôlées tels que des méso-microcosmes) et moyen termes (*via* des sites expérimentaux épandant des digestats depuis plus de 5 ans) des digestats de méthanisation sur la biologie des sols.
- Etablir des liens entre la qualité biologique des sols et les pratiques agronomiques dans un contexte de système utilisant du digestat. Ceci a été réalisé *via* des prélèvements au champ dans des parcelles cibles appartenant à un réseau d'agriculteurs déjà utilisateurs de digestats. Ce réseau a été mis en place spécifiquement dans le cadre de ce projet.
- Transférer et communiquer les résultats obtenus aux différents acteurs en lien avec la gestion des digestats de méthanisation (agriculteurs utilisateurs, accompagnateurs de projets, conseillers agricoles, collectivités, chercheurs, grand public...).

2. Bio-indicateurs choisis pour évaluer l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles

Dans le cadre du projet Metha-BioSol, la définition du tableau de bord d'indicateurs s'est largement inspirée de ce qui avait été auparavant effectué dans le cadre du projet AgrInnov (CASDAR IP 2012-2015). Dans AgrInnov, les indicateurs retenus se basaient sur des mesures de la flore microbienne du sol (bactéries et champignons), de la micro- et macrofaune du sol (nématodes et lombriciens), complétées par un indicateur de l'état structural du sol (test bêche) et un indicateur de l'activité de dégradation des matières organiques fraîches (LEVAbag) (Cannavacciuolo et al., 2017). En effet, le rôle essentiel que jouent ces organismes dans le fonctionnement biologique des sols et la durabilité des agrosystèmes explique largement ce choix. Parmi les critères d'évaluation des indicateurs, les plus importants étaient 1) d'être validés scientifiquement via des programmes de recherche (ADEME Bioindicateur I et II, ANR ECOMIC-RMQS, ADEME RMQS-BIODIV...), 2) de disposer d'un référentiel d'interprétation pour les grandes cultures afin de permettre la réalisation d'un diagnostic de l'impact des pratiques agricoles sur la biologie des sols et 3) d'être mesurables à un coût économique abordable, facilement opérationnels sur le terrain et au laboratoire. Les problématiques environnementales et sanitaires liées au retour au sol des digestats de méthanisation ont incité le *consortium* du projet Metha-BioSol à enrichir ce tableau de bord avec deux autres types d'indicateurs : ceux relatifs aux pathogènes des sols et ceux en lien avec les formes et quantités de carbone présent dans les sols. Pour le projet Metha-BioSol, le tableau de bord d'indicateurs proposés était le suivant (Figure 1) :

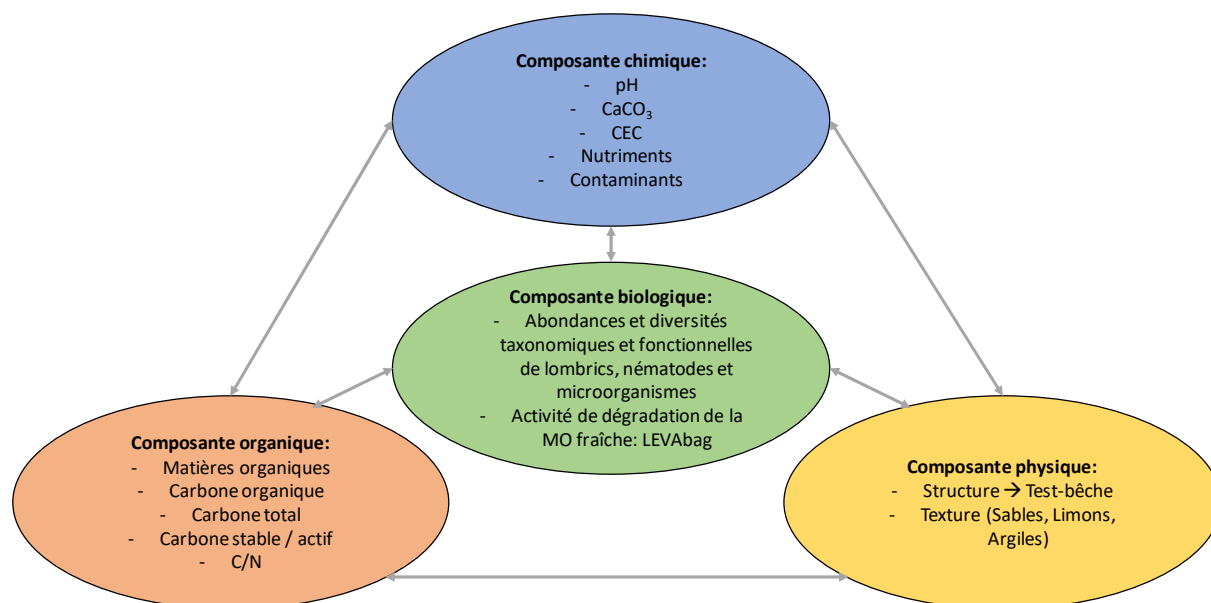


Figure 1 : Tableau de bord des indicateurs de la qualité biologique des sols proposé dans le cadre du projet Metha-BioSol. MO fraîche : matière organique fraîche, CEC : capacité d'échange cationique

3. Evaluation de l'impact de différents types de digestats sur la qualité biologique des sols à court terme

Il s'agissait ici d'étudier d'une part les impacts liés à la valorisation agronomique des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols en conditions contrôlées, et d'autre part d'identifier les facteurs édaphiques susceptibles de moduler ces impacts. Cette partie du projet se focalisait sur les impacts à court terme. Deux hypothèses étaient considérées : 1) Les impacts sont différents en fonction de la nature physico-chimique des sols et 2) Les impacts sont différents en fonction de la nature des digestats.



3.1. Matériel et Méthodes

Dans cette étude factorielle, les dispositifs expérimentaux étudiés ont été sélectionnés de façon à réduire le nombre de variables non maîtrisées. Ainsi, l'épandage de digestats a été simulé en conditions de laboratoire à l'aide de mésocosmes et de microcosmes de sol de façon à maîtriser les conditions expérimentales. Les mésocosmes ont permis de produire les résultats relatifs aux indicateurs suivants : nématodes, lombriciens, activité de dégradation de la matière organique fraîche, formes et quantité de carbone. Les microcosmes ont permis de générer des résultats relatifs aux microorganismes et pathogènes du sol.

Concrètement, 3 types de méso- et microcosmes ont été construits à partir de 3 sols à la pédologie contrastée représentatifs des sols des régions investies dans le projet. La figure 2 illustre les différences de textures observées entre ces trois sols. Outre les différences de texture, les sols sélectionnés présentaient des profils chimiques sensiblement différents. Le sol limono-argileux calcaire (Sol 1) avait un pH alcalin, une teneur plus élevée en carbone, en azote et en phosphore, et une CEC plus élevée. Les sols sableux et limoneux étaient légèrement acides. Le sol limoneux (Sol 3) avait une teneur en carbone et en azote légèrement plus élevée que le sol sableux (Sol 2).

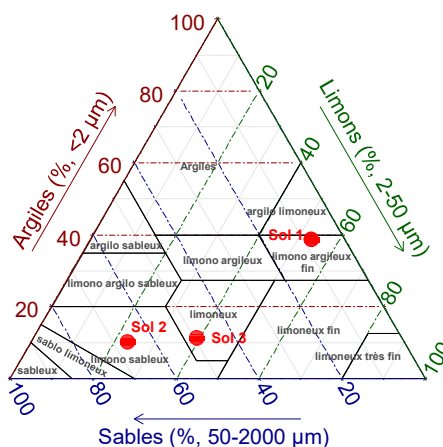


Figure 2 : Triangle des textures des trois sols utilisés pour les micro- et mésocosmes

Chaque type de cosmes (= type de sol) a reçu 8 modalités d'apports : 4 types de digestats (décrits ci-dessous), 1 lisier de bovin (CS), 1 fumier de bovin (CM), 1 apport minéral sous forme d'ammonitrate et une modalité sans apport (eau). Les différents types de digestats comprenaient les biomasses entrantes suivantes :

- Digestat 1 (FYM) : (82 % fumier bovin - 6,5 % matières végétales (3 % maïs/sorgho, 3 % matières végétales diverses) – 7 % dérivé lait (liquide) – 2 % lisier bovin – 2 % lisier porc - 0,5 % graisse)
- Digestat 2 (MFW) : (56 % fumier bovin – 20 % matières végétales (3 % maïs/sorgho, 2 % culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE) d'hiver, 15 % autres matières végétales) – 5 % graisses – 4 % lisier bovin – 13 % biodéchet (sang, glycérine, divers) – 2 % lisier porc)
- Digestat 3 (SMS) : (100 % matières végétale (55 % maïs/sorgho, 45 % CIVE hiver))
- Digestat 4 (CMF) : (45 % lisier de canard – 40 % graisse – 15 % matières végétales)

Les quantités de matière organique appliquée correspondaient à 35 T/ha pour les mésocosmes et 25 T/ha pour les microcosmes. Le tableau 1 donne les teneurs en éléments apportés par les produits organiques équivalents à 35 T/ha. Après 42 jours d'incubation pour l'ensemble des dispositifs, les échantillons de sol ont été prélevés pour analyse de la qualité biologique et physico-chimiques des sols.

Tableau 1 : Teneurs en éléments apportés par des produits organiques équivalents à 35 T/ha



Produits organiques	pH	C/N	Carbone organique total (kg/ha)	Azote total (kg/ha)	Azote ammoniacal (kg/ha)	NH ₄ ⁺ /N _{tot} (%)
FUMIER (CM)	8,9	18,3	202,3	111,4	15,8	14,2
LISIER (CS)	7,7	1,5	20	77,1	52,4	68
FYM	8,8	6,3	104	157,1	55,6	35,4
MFW	8,3	2,8	84,9	177,1	80,4	45,4
SMS	8	4,5	64	105,7	33,9	32,1
CMF	8,4	0,8	28,3	194,3	130,2	67

3.2. Résultats

LevaBag (mesure de l'activité de dégradation de la matière organique fraîche)

Les résultats obtenus en mésocosmes confirment que l'effet d'un apport de matières organiques, dont des digestats, est variable en fonction du sol sur lequel il est appliqué et de la nature de ces matières organiques. Ainsi, il apparaît que le sol sableux utilisé dans les mésocosmes présente en moyenne la capacité de dégradation des Matières Organiques Fraîches (MOF) la plus élevée de 20 % par rapport aux sols argileux et limono-sableux. Il n'a pas été mis en évidence d'effet significatif du type de digestat sur la dégradation d'une MOF, et cela quel que soit le type de sol considéré. Il semble que l'apport de certaines matières organiques, notamment celles présentant le C/N le plus élevé (C/N = 18,3 pour le fumier), soient responsables d'une augmentation de la dégradation.

Lombriciens

D'un point de vue méthodologique, les résultats sur les lombriciens ne portent que sur une variable comportementale (localisation dans le sol) et deux variables biologiques (le poids individuel et le taux de mortalité des lombriciens). Tous les lombriciens introduits ont été récupérés vivants, ce qui met en évidence qu'il n'y a pas eu d'effet du type de digestats sur la mortalité des lombriciens à court terme. Concernant l'évolution du poids des lombriciens, les résultats de cette expérimentation confirment que l'effet des digestats est variable selon la nature des digestats et du type de sol. Comparé à un fumier classique non digéré (CM), les différents types de digestat ont accentué la perte de poids des lombriciens. Toutefois, il est important de rappeler qu'au cours de cette expérimentation, les lombriciens ont perdu 20 % de poids en moyenne, dû aux contraintes de l'approche expérimentale multi-taxons (micro-organismes, méso- et macro-faune) ce qui limite les interprétations et ne permet pas de généraliser ces résultats.

Nématodes

Dans cette étude, les apports de digestats ont eu un effet faible sur l'abondance des nématodes, notamment en comparaison à un apport de fumier (CM) ou un traitement avec fertilisation minérale. La faible stimulation de l'indice d'enrichissement (EI) malgré les forts flux de nutriments dans les sols (nitrates notamment) par les digestats est surprenante, mais provient probablement du fait que la majeure partie des éléments apportés par les digestats sont sous forme minérale et ne représentent pas une ressource pour les organismes du sol. Tous les apports de digestats tendent à réduire la diversité des nématodes du sol ; cet effet est particulièrement marqué pour les digestats CMF et MWF. De manière globale, les différents traitements ont eu plus d'effet sur le sol limono-argileux et le sol sableux, que sur le sol limoneux.



Microorganismes

Comme pour la plupart des autres indicateurs du projet, les résultats obtenus en microcosmes confirment que l'effet d'un apport de matières organiques, dont des digestats, est variable en fonction du sol sur lequel il est appliqué et de la nature de ces matières organiques. Au global, il apparaît que les sols sableux sont plus sensibles (chute de la biomasse microbienne, modification de la diversité microbienne présente) à l'apport de certains digestats ; notamment ceux présentant un C/N faible, soit une quantité d'azote (ammonium) importante.

Pathogènes

Les résultats de ces expérimentations en microcosmes montrent tout d'abord que certains indicateurs sanitaires ont été détectés après les 42 jours d'incubation. Une fois encore, la détection des pathogènes dépend du type de sol ainsi que du type de matières organiques utilisées. Les résultats dépendent également de l'indicateur considéré. En effet, *Escherichia coli* et *Salmonella enterica* n'ont jamais été détectées après incubation alors que le complexe *K. pneumoniae* présentait la prévalence la plus importante. La détection du genre *Listeria* et de *L. monocytogenes* était quant à elle limitée. Enfin, les expériences de contamination artificielle d'un digestat avec *K. pneumoniae* et *L. monocytogenes* ont montré que la concentration initiale des pathogènes influe sur la durée de leur détection au cours de l'incubation et ont confirmé un effet « sol » significatif sur le devenir de *K. pneumoniae* et *L. monocytogenes*.

3.3. Conclusions

Les résultats obtenus en méso- et micro-cosme montrent qu'en conditions contrôlées et sur sol nu, l'impact des digestats de méthanisation sur la biologie des sols est dépendant du type de digestat et du type de sol. Globalement, les sols sableux semblent plus sensibles à l'apport de digestats, notamment ceux présentant un C/N faible, soit une quantité d'azote (ammonium) importante.

4. Evaluation de l'impact des différents types de digestats sur la qualité biologique des sols à moyen terme

Afin d'étudier les effets à moyen terme, le présent projet s'appuie sur des sites expérimentaux, épandant de façon récurrente et depuis plusieurs années des produits résiduels organiques (PRO), dont des digestats de méthanisation. Concrètement, ces sites font partie du SOERE-PRO (Système d'observation et d'expérimentation sur le long terme pour la recherche en environnement – Produit Résiduels Organiques, sites d'EFELE et PROspective) et de l'exploitation agricole de l'EPLFPA du Bas-Rhin (site Dige'O).

4.1. Matériel et Méthodes

Les trois sites retenus dans le projet Metha-BioSol sont situés sur des territoires différents : Bretagne (EFELE) et Alsace (PROspective et Dige'O), et présentent des contextes pédoclimatiques différents. D'autre part, chaque site épand un ou plusieurs type(s) de digestats particuliers, représentatifs de son territoire.

- **PROspective** - sols argilo-limono calcaires dans la plaine d'Alsace (climat semi-continental) :
 - Digestat : 60 % déchets industries agro-alimentaires (IAA), 20 % végétaux, 20 % effluents d'élevage
- **Dige'O** - sols argilo-limono calcaires dans la plaine d'Alsace (climat semi-continental):
 - Digestat Méthachrist (DIGMETH): 38 % végétaux, 43 % effluents d'élevage, 19 % déchets IAA



- Digestat Obernai (DIGOB): 23 % végétaux, 40 % effluents d'élevage, 37 % déchets IAA
- Digestat Obernai corrigé (DIGCOR): 23 % végétaux, 40 % effluents d'élevage, 37 % déchets IAA + Glenor kr+

Le digestat Obernai corrigé correspond au digestat d'Obernai auquel on mélange le produit Glenor Kr+, au moins une heure avant épandage. Le produit Glenor KR+ est un composteur rapide constitué d'argile et d'algues avec des activateurs biodynamiques (la composition précise du produit n'est pas disponible).

- **EFELE** - sols limoneux (climat tempéré-océanique) :
 - Digestat Lisier de Porc (DIG_LP) : 100 % effluents d'élevage
 - Digestat T (DIG_T) : 70 % effluents d'élevage (Lisier de Bovin), 20 % CIVE, 10 % autres végétaux
 - Digestat L (DIG_L) : 80 % déchets IAA, 13 % effluents d'élevage (Lisier de Porc), 7 % graisses

Les fréquences et les historiques d'apport de digestats varient également selon le site expérimental considéré :

- **PROspective** :
 - Tous les ans sur 4 parcelles depuis 2014 (prélèvements de sols en 2022, soit 8 ans de récurrence d'apport (= 8 campagnes d'apports))
 - Pour les autres parcelles, tous les deux ans en compléments d'autres PRO apportés en année n et ce, depuis 2016 (prélèvements de sols en 2022, soit 6 ans de récurrence d'apport (= 3 campagnes d'apports))
- **Dige'O** :
 - Apport annuel entre 2013 et 2016
 - Pas d'épandage entre 2016 et 2018
 - Puis, depuis 2018 épandage de digestats tous les ans (prélèvements de sols en 2022, soit 4 ans de récurrence d'apport (= 4 campagnes d'apports))
- **EFELE** :
 - DIG_LP : tous les ans au printemps depuis 2012 (prélèvements de sols en 2022, soit 10 ans de récurrence d'apport (= 10 campagnes d'apports))
 - DIG_T et DIG_L : ces traitements ont respectivement remplacé des apports biannuels de fumier de bovins (dose 50 t/ha) et de fumier de porc composté (dose 25 t/ha) à partir de 2021.

Sur les trois sites expérimentaux, des prélèvements de sol ont été réalisés en sortie d'hiver juste avant les épandages sur différentes parcelles présentant différentes modalités d'apport (Digestat, PRO, fertilisation minérale (MIN)...). Ceci permet d'avoir une approche factorielle des impacts (fertilisation minérale vs. digestats, digestats vs. PRO (ex : lisier, fumier...)).

Grâce à une analyse statistique combinée (Analyse Factorielle Multiple - AFM), l'effet des différentes modalités d'apport a été testé sur l'ensemble des indicateurs (physico-chimiques, biologiques, fonctionnement), pour chaque site expérimental. Afin de tester la significativité de la dispersion des modalités de la variable traitement (fertilisation minérale ou d'apport de PRO), un modèle d'analyse de variance à un facteur est réalisé pour chaque dimension de l'AFM. Les variables à expliquer sont les coordonnées des individus sur les axes factoriels de l'AFM et la variable explicative correspond au traitement. Un test F permet donc de voir si la variable a un effet significatif sur la dimension et si certaines modalités de la variable traitement sont significativement différentes de celles de l'ensemble de la population (la plus grande distance entre les modalités sur la dimension considérée).

4.2. Résultats et conclusions

Pour le site expérimental EFELE, seule la première dimension de l'AFM est significative ($p < 5\%$) et permet d'opposer la modalité Fumier (FB ; coordonnées positives) à la modalité fertilisation minérale



(MIN, coordonnées négatives ; Figure 3). Les paramètres physico-chimiques associés à cette dimension sont le pH, la CEC, le carbone actif et le rapport C/N (coordonnées positives). Ensuite, la dégradation de la matière organique fraîche (LevaBag) et la biomasse microbienne (coordonnées positives) sont corrélées à ces paramètres physico-chimiques et s'opposent à la diversité en champignons (coordonnées négatives). Pour le site expérimental de PROspective, les deux premières dimensions de l'AFM sont significatives (respectivement F1 $p < 1\%$ et F2 $p < 5\%$). Ainsi, la biomasse lombricienne totale, les nématodes phytophages et bactérivores opportunistes (coordonnées positives) sont corrélées à la première dimension de l'AFM. Ces variables permettent d'opposer la modalité Fumier non digéré + Digestat (FUM_DIG ; coordonnées positives) à MIN (coordonnées négatives). Concernant la deuxième dimension de l'AFM, les paramètres physico-chimiques associés à cette dimension sont l'azote total, la matière organique et le carbone actif (coordonnées positives). Ensuite, la dégradation de la matière organique fraîche (LevaBag) et la biomasse microbienne (coordonnées positives) sont corrélées à ces paramètres physico-chimiques et s'opposent à la diversité en champignons (coordonnées négatives). Cet axe factoriel oppose la modalité Compost de biodéchets + fertilisation minérale (BIO_MIN, coordonnées positives) à la modalité Digestat (DIG, coordonnées négatives). Pour le site expérimental Dige'O, aucun test F n'est significatif. Ainsi, aucune dimension de l'AFM ne permet de différencier les traitements entre eux.

Pour rappel, les différents sites expérimentaux n'avaient pas tous le même historique d'apport de digestats lors des prélèvements de sol en 2022. Le plus ancien était EFELE (10 ans) et pour les apports de Digestat de lisier de porc (DIG_LP), puis PROspective (8 ans) et ensuite Dige'O (4 ans). Les résultats obtenus pour Dige'O et PROspective montrent qu'au bout de trois à huit campagnes d'apports, la biologie du sol des parcelles ayant reçu du digestat (et uniquement du digestat pour PROspective) s'avère être proche de celle des parcelles ayant reçu une fertilisation minérale mais très éloignée de celle des parcelles ayant reçu du fumier (Figure 3A et B). En revanche, sur le site d'EFELE, après 10 campagnes d'apport de digestat, la biologie du sol des parcelles testées se retrouve en position intermédiaire par rapport aux parcelles amendées avec un fumier ou fertilisées avec un engrais chimique (Figure 3C). Certes, les digestats testés entre les différents sites sont différents, tout comme les contextes pédoclimatiques. Les résultats obtenus sont donc à consolider, mais ils suggèrent un effet pivot des digestats sur la biologie des sols entre 8 et 10 ans de répétitions après le début des apports.

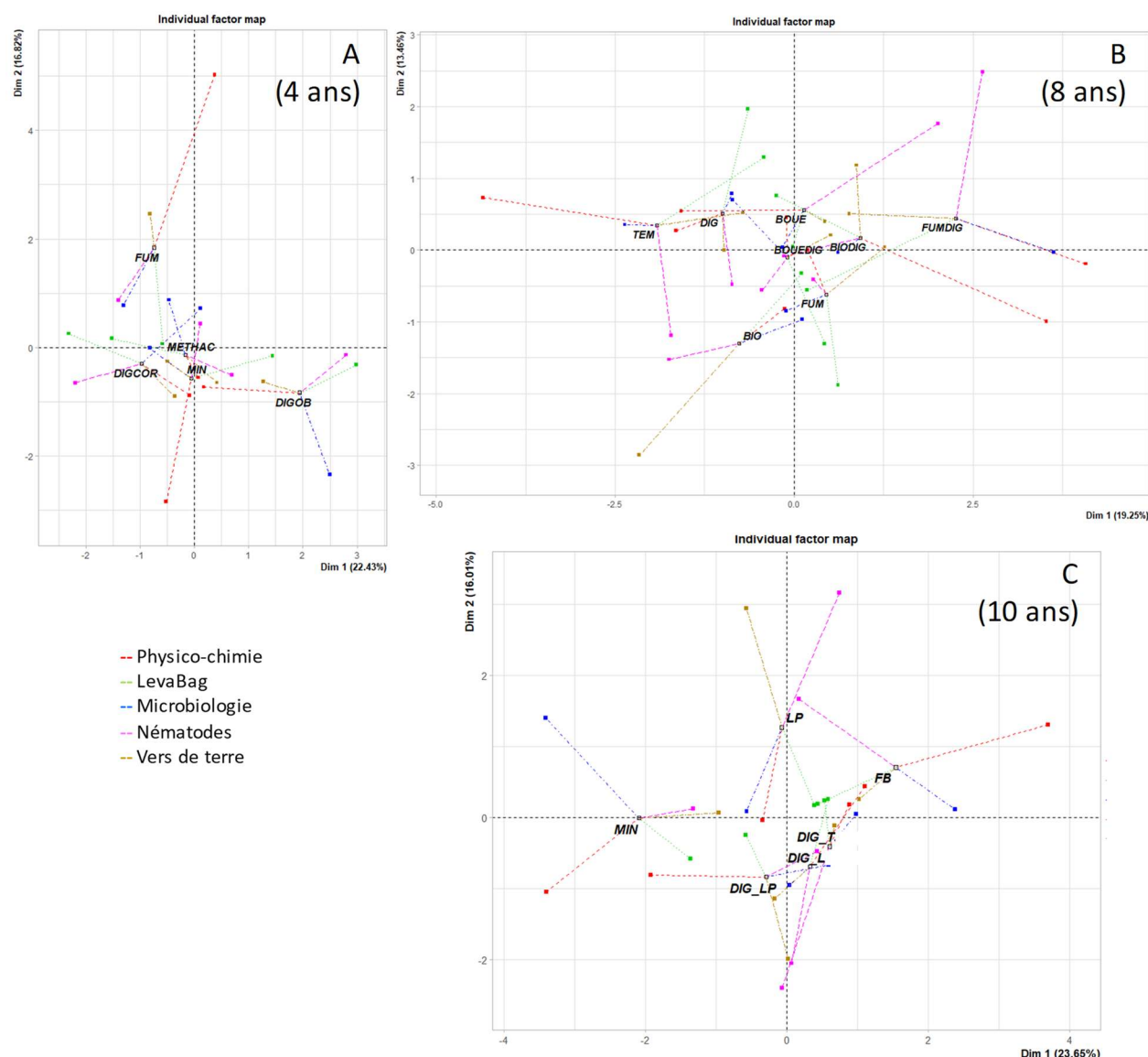


Figure 3 : Effet des différentes modalités d'apport sur les indicateurs de la biologie des sols pour les trois sites expérimentaux testés dans le projet Metha-BioSol (A : DIGE'O ; B : PROspective et C : EFELE). Abréviations des modalités pour DIGE'O: MIN: Fertilisation Minérale / FUM: Fumier de bovins non digéré / DIGOB: Digestat Obernai / DIGCOR: Digestat Obernai corrigé / METHAC: Digestat MethaChrist ; Abréviations des modalités pour PROspective: DIG: Digestat / TEM: Fertilisation Minérale / FUM_DIG: Fumier non digéré + Digestat / FUM: Fumier non digéré + MIN / BOUE_DIG: Boue de station d'épuration + Digestat / BOUE: Boue de station d'épuration + MIN / BIO_DIG: Compost de biodéchets + Digestat / BIO_MIN: Compost de biodéchets + MIN ; EFELE : DIG: Digestat / MIN: Fertilisation Minérale / FB : Fumier non digéré / LP: Lisier non digéré / DIG_LP: Digestat de lisier de porc / DIG_L : digestat de lisier de bovin / DIG_T : digestat territorial.

5. Impact des pratiques agronomiques liées à l'épandage de digestats sur un réseau de fermes agricoles

Dans cette partie du projet, il s'agissait d'évaluer, en conditions réelles de terrain, l'impact des digestats et des pratiques agricoles sur la qualité biologique des sols agricoles grâce à un réseau de fermes agricoles épandant des digestats de méthanisation depuis plusieurs années.



5.1. Matériel et Méthodes

Construction d'un réseau de fermes agricoles épandant des digestats de méthanisation

Un réseau de 71 fermes agricoles épandant des digestats de méthanisation a été mobilisé dans 5 régions françaises : Bretagne, Pays de la Loire, Bourgogne Franche-Comté, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Occitanie. Le principal critère de sélection des fermes de ce réseau était d'épandre du digestat brut, liquide ou solide (issus de séparation de phase par presse à vis voire centrifugation) depuis au moins 3 campagnes de fertilisation afin d'observer un potentiel effet long terme. Les fermes épandant des digestats ayant subi un post-traitement comme le compostage ont été exclues.

Pour chaque ferme de ce réseau, une parcelle fertilisée avec du digestat a été prélevée. Les échantillons de sols ont été prélevés en sortie d'hiver sur céréales d'hiver et prairie juste avant les épandages (janvier-février 2022 et 2023). L'ensemble des indicateurs du tableau de bord mis en place dans le projet a été déployé sur les échantillons prélevés (Figure 1). Des indicateurs de synthèse (patrimoine biologique et fertilité biologique ; Cannavacciuolo *et al.*, 2017), reprenant les indicateurs du tableau de bord, ont ensuite été construits afin de faciliter la lecture et la discussion autour des résultats obtenus (Figure 4). Le patrimoine biologique correspond à la diversité des organismes présents dans le sol, il est garant de l'assurance écologique du sol. La fertilité biologique est portée par l'ensemble des organismes du sol. L'expression de cette fonction dépend de l'abondance, de la diversité et de l'activité des organismes du sol.

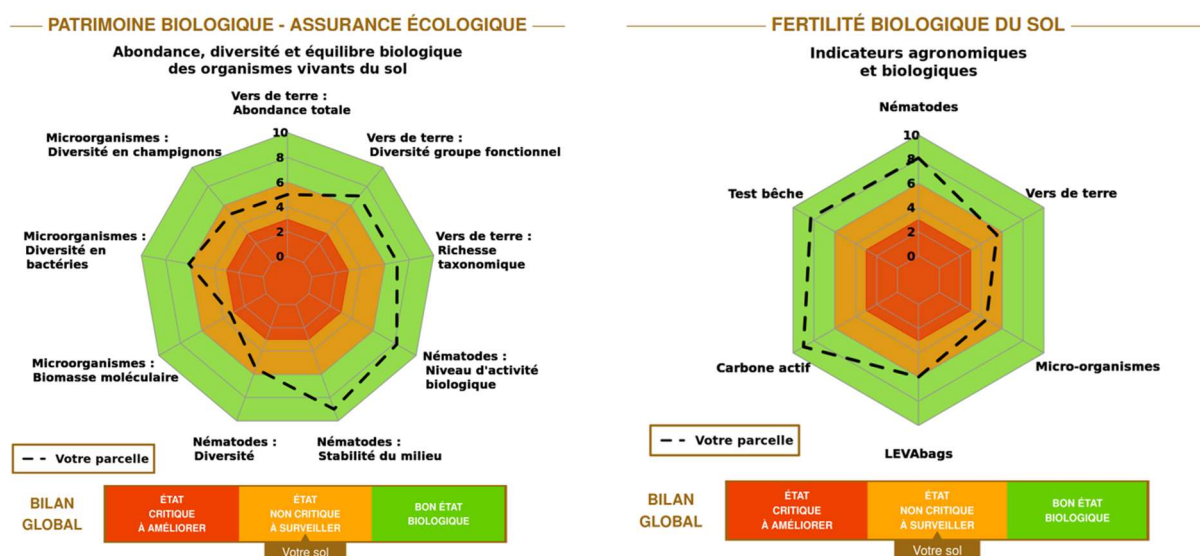


Figure 4 : Indicateurs de synthèse de la biologie des sols (patrimoine et fertilité biologique)

Sur la même période que les échantillonnages de sol, des enquêtes ont été effectuées auprès des agriculteurs du réseau de fermes sur les pratiques suivantes : travail du sol (mode et profondeur d'implantation, durée de sol nu), couverture végétale (diversité des cultures principales dans la rotation, présence d'intercultures CIPAN, de CIVE, durée de sol nu), fertilisation (fertilisation minérale, fertilisation organique autre que par le digestat, restitution des résidus de culture), digestat (type de digestat (brut, liquide, solide), fréquence d'apport et historique d'apport).

Analyses statistiques des données

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur les données physico-chimiques des sols provenant des différentes parcelles échantillonnées dans le cadre du réseau de fermes. Par la suite, pour chaque cluster identifié, les indicateurs de synthèse de la biologie des sols (Patrimoine et Fertilité biologique) ont été générés.

Afin de tester l'effet de certaines pratiques agricoles, en lien avec l'apport de digestat, sur la qualité biologique des sols, un test exact de Fisher, utilisé pour l'analyse des tableaux de contingence, a été effectué pour chacune des variables issues de l'enquête (travail du sol, couverture végétale, fertilisation, digestat, fréquence d'apport et historique d'apport) et croisées avec les indicateurs de synthèse de la biologie des sols.

5.2. Résultats et conclusion

La typologie, obtenue sur les données physico-chimiques des sols prélevés dans le cadre du réseau de fermes, montre 4 clusters distincts (Figure 5) relatifs à des types de sol différents. Les résultats issus du test exact de Fisher ne montrent aucun effet significatif du type de sol sur les indicateurs de synthèse (patrimoine biologique, $p=0,433$; fertilité biologique, $p=0,129$).

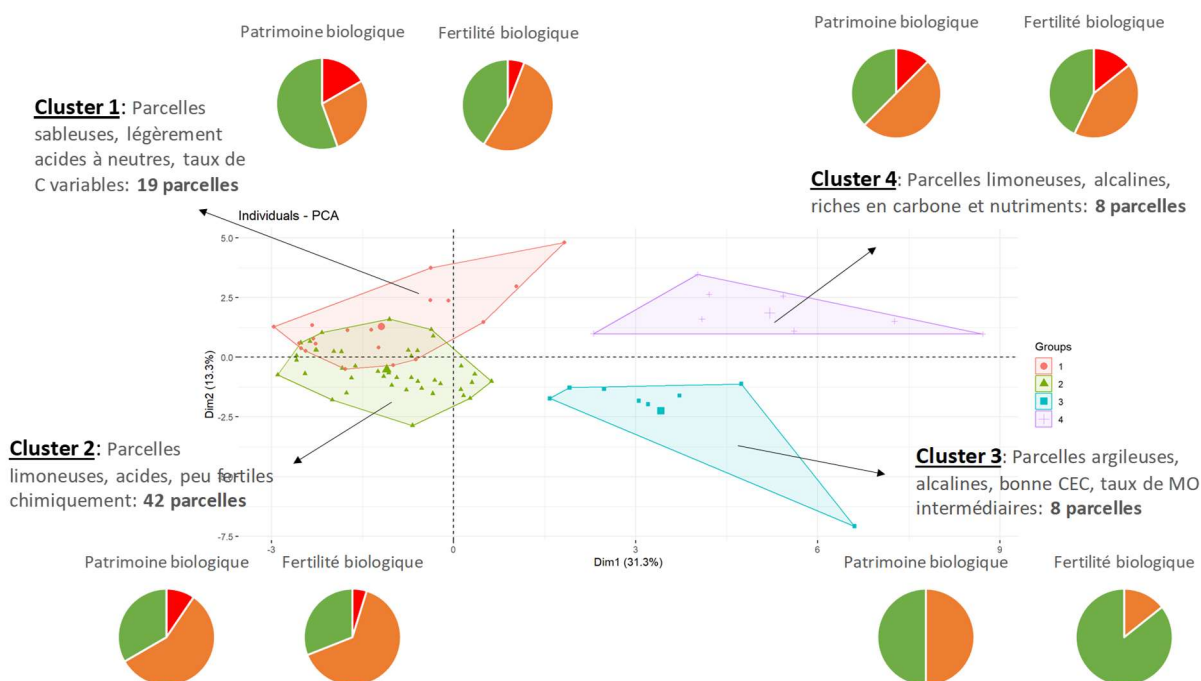


Figure 5 : Projection des parcelles prélevées dans le cadre du réseau de fermes selon les données physico-chimiques de leur sol. Mise en évidence pour chaque cluster des résultats issus des indicateurs de synthèse de la biologie des sols (patrimoine et fertilité biologique). Vert : bon état, orange : état non critique à surveiller, rouge : état critique.

Les données issues des enquêtes ont permis d'identifier deux pratiques agricoles liées à l'utilisation de digestat ayant un effet significatif sur les indicateurs de synthèse de la qualité biologique des sols : le type de digestat et les cultures et inter-cultures présentes dans la rotation. Ainsi, nos résultats ont montré que le type de digestat apporté à la parcelle avait un impact significatif sur la fertilité biologique des sols ($p=0,024$). Les digestats issus d'une ration entrante composée majoritairement d'effluents d'élevage ruminant favorisaient plus la fertilité biologique des sols que les digestats composés majoritairement de végétaux ou d'effluents d'élevage non-ruminant (Figure 6). Ceci peut s'expliquer par une quantité de carbone organique apportée plus élevée pour ce type de digestats, stimulant ainsi de façon plus importante la vie du sol. En revanche, dans ce jeu de données, la présence de CIVE dans la rotation de cultures induisait un impact négatif sur le patrimoine biologique des sols ($p=0,031$; Figure 6). Les enquêtes réalisées sur les pratiques agricoles du réseau de fermes ne permettaient pas d'identifier clairement les CIVE implantées, ni de qualifier le système de cultures associé. Toutefois, il serait intéressant de regarder si ce résultat illustre l'impact d'une pratique en particulier (type d'espèce



implantée en CIVE) ou d'un système dans sa globalité (rotation et retour au sol des couverts). Des travaux complémentaires sur les systèmes de culture sont nécessaires pour renseigner cette hypothèse.

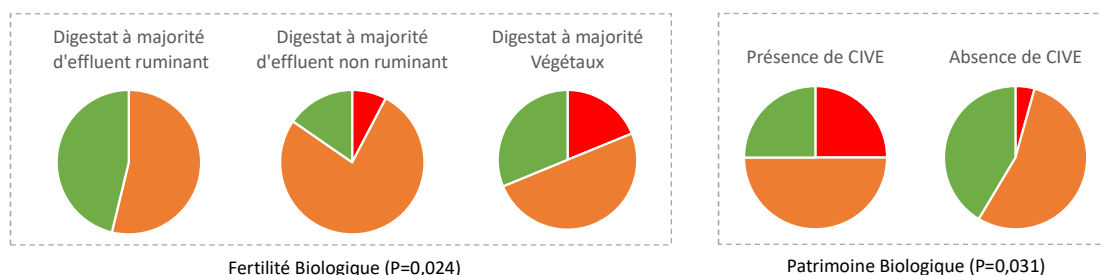


Figure 6 : Effet du type de digestat et de la présence de CIVE dans la rotation de cultures sur les indicateurs de synthèse du réseau de fermes du projet Metha-BioSol. Vert : bon état, orange : état non critique à surveiller, rouge : état critique.

6. Conclusions

Le projet Metha-BioSol a permis de générer des données contribuant à évaluer l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique et écologique des sols en utilisant des bio-indicateurs opérationnels. Les résultats obtenus montrent que l'impact des digestats sur la qualité biologique des sols dépend du type de sol, mais également du type de digestat. Il n'y a pas un digestat, mais des digestats dont une typologie basée sur les rations entrantes dans le méthaniseur vient d'être établie (Jimenez et al., 2024). Pour résumer, le projet Metha-BioSol montre que l'effet des digestats sur la vie du sol n'est pas neutre, notamment pour ceux présentant un C/N faible. Par ailleurs, pour des digestats ayant un C/N faible, une répétition d'apport sur plus de 10 ans entraîne un effet similaire à une fertilisation minérale. Enfin, en situations réelles, le projet Metha-BioSol tend à montrer qu'au-delà des digestats, il est essentiel de prendre en compte l'impact de la combinaison de pratiques sur les indicateurs de la qualité biologique du sol. Evaluer cet impact nécessite une réflexion à l'échelle du système en ayant toutefois des points de vigilance en fonction du type de sol, du type de digestats utilisé et/ou certaines pratiques culturales mise en œuvre. Les résultats de ce réseau de fermes constituent le premier référentiel d'interprétation à l'échelle nationale de l'impact de pratiques agricoles valorisant des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols. Avec une ambition nationale de multiplier par vingt la production de biogaz par méthanisation à l'horizon 2050, il est primordial de maintenir et de développer ce réseau de fermes. Dans la mesure où les systèmes de culture sont construits sur un ensemble de compromis pour tenir compte des contraintes des agriculteurs, l'ambition d'un tel réseau sera d'identifier les leviers agronomiques qui permettront de trouver les bons compromis pour la mise en place de la méthanisation sur une exploitation agricole, et d'accompagner les agriculteurs pour rendre la méthanisation compatible avec la préservation de la qualité des sols.

Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles à l'URL suivante : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/methabiosol>

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.



ORCID

Sophie Sadet-Bourgeteau : 0000-0002-7533-4289

Daniela Mora-Salguero : 0009-0004-7769-3578

Cécile Villenave : 0000-0003-3624-0498

Pierre Barré : 0000-0002-0822-0556

Daniel Cluzeau : 0000-0002-0822-0556

Pascal Piveteau : 0000-0002-1210-251X

Kévin Hoeffner : 0000-0003-3740-6058

Thierry Morvan : 0000-0002-6678-2661

Pierre-Alain maron : 0000-0003-2315-0741

Lionel Ranjard : 0000-0002-7720-5843

Samuel Dequiedt : 0000-0002-1122-4136

Mario cannavacciuolo : 0000-0001-8996-6407

Contributions des auteurs

Conceptualisation : Tous les auteurs ; Curation des données : SBS, DMS, CC, PB, DC, PP, KH, MC ; Analyse formelle : SBS, DMS, CC, PB, DC, PP, KH, MC, AB, SD ; Obtention de financement : SBS, PM, VJB ; Recherche : Tous les auteurs ; Méthodologie : Tous les auteurs ; Administration du projet : SBS, PM ; Ressources : SBS, DMS, CC, CV, PB, DC, PP, KH, MC, AH, AS, MM, VR, AH, GV, TM, MG, MJ, VS, AR, AL, JT, PM ; Développement informatique : MC, AB, SD ; Validation : SBS, DMS, CC, PB, DC, PP, KH, MC, AB, SD ; Visualisation : SBS, CC, MC ; Rédaction – version originale : Tous les auteurs ; Rédaction – Révision et correction : SBS.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

L'équipe du projet Metha-BioSol remercie les financeurs du projet pour leur soutien et la confiance accordée, les équipes partenaires du projet pour leur implication et l'ensemble des agriculteurs ayant participé à la mise en place du réseau.

Déclaration de soutien financier

Le projet Metha-BioSol a été financé par l'ADEME (Appel à projet GRAINE), le ministère de l'agriculture (CASDAR Innovation et Partenariat) et GrDF.

Références bibliographiques :

ANSES, 2018. Conclusions de l'évaluation relatives à la demande d'autorisation de mise sur le marché de la société SAS BIOVILLENEUVOIS pour l'ensemble de produits FERTI-BIOVILLENEUVOIS. Burmeister, J., Walter, R., Fritz, M., 2015. Effets de la fertilisation des digestats issus de la méthanisation sur la faune du sol, in: Forum, B. (Ed.). Cannavacciuolo, M., Cassagne, N., Riou, V., Mulliez P., Chemidlin, N., Dequiedt, S., Villenave, C., Cérémonie, H., Cluzeau, D., Cyilly, D., Vian, J.F., Peigné, J., Gontier, L., Maron, P.A., D'Oiron Verame, E., Ranjard, L., 2017. Validation d'un tableau de bord d'indicateurs sur un réseau national de fermes en grande culture et en viticulture pour diagnostiquer la qualité biologique des sols agricoles. *Innovations Agronomiques* 55, 41-54 - <https://doi.org/10.15454/1.5137753402510786E12> Jimenez J., Moreira M., Berger S., Capowiez Y., Caradec L., Desneulin I., Générumont S., Halbin E., Haumont A., Heurtaux M., Houot S., Johnson M., Le Roux C., Menasseri S., Michaud A., Patureau D., Pérès G., Thiébaud S., Stangret V., 2024. Guide des bonnes pratiques d'utilisation des digestats de méthanisation pour optimiser leurs intérêts agronomiques.



Rapport final. 75 pages. Karimi, B., Sadet-Bourgeteau, S., Cannavacciuolo, M., Chauvin, C., Flamin, C., Haumont, A., Jean-Baptiste, V., Reibel, A., Vrignaud, G., Ranjard, L., 2022. Impact of biogas digestates on soil microbiota in agriculture: a review. *Environmental Chemistry Letters* 20, 3265-3288.

Koblenz, B., Tischer, S., Rücknagel, J., Christen, O., 2015. Influence of biogas digestate on density, biomass and community composition of earthworms. *Industrial Crops and Products* 66, 206-209.

MethaLAE-CASDAR, P., 2018. Améliorer la fertilité des agrosystèmes. Reibel, A., 2018. Valorisation agricole des digestats: Quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement?, La méthanisation en Provence-Alpes-Côte d'Azur.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.