



HAL
open science

Impact de l'insertion de la méthanisation sur le bilan C et N en exploitation polyculture élevage (projet MétaMétha)

Antoine Savoie, Catherine Pasquier, Victor Moinard, Sabine Houot

► To cite this version:

Antoine Savoie, Catherine Pasquier, Victor Moinard, Sabine Houot. Impact de l'insertion de la méthanisation sur le bilan C et N en exploitation polyculture élevage (projet MétaMétha). [Contrat] INRAE. 2020, 14p. hal-03196292

HAL Id: hal-03196292

<https://hal.inrae.fr/hal-03196292>

Submitted on 12 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

APPEL A PROJETS DE RECHERCHE D'INTERET REGIONAL

APR IR2016

RAPPORT D'ACTIVITES

Nom du projet :

Impact de l'insertion de la méthanisation sur le bilan C et N en exploitation polyculture élevage

Acronyme :

MétaMétha

N° de la convention :

2016 00108447

Etude réalisée par : INRA UE PAO, INRA UR SOLS et INRA UMR ECOSYS

Responsable coordinateur : SAVOIE Antoine, antoine.savoie@inrae.fr

Autres partenaires impliqués dans le projet :

Chambre d'agriculture du Loiret (45)

Chambre d'agriculture d'Indre-et-Loire (37)

EVEA (bureau d'étude)

CVBN (méthaniseur)

Version simplifiée pour diffusion

1. Résumé en langage vulgarisé des résultats scientifiques

Le projet a consisté en l'équipement et la caractérisation d'un dispositif expérimental composé de 4 parcelles (24x75 m) correspondant à 4 systèmes (effluents bruts ; digestat brut ; digestats après séparation de phase ; engrais minéral) sur lesquels différents produits résiduels organiques (PRO) ont été épandus au cours d'une rotation blé, colza, blé. Des mesures ont été effectuées sur le terrain (azote du sol, lessivage, gaz à effet de serre, exportation par les récoltes, etc.). En complément, la modélisation a permis d'aboutir au bilan azoté de chaque système. Suite à l'étude de la qualité de la matière organique des PRO, le stockage dans le sol de la matière organique a été simulé à long terme : les digestats permettent un stockage légèrement inférieur au effluent non méthanisés. Enfin, une analyse de cycle de vie (ACV) à l'échelle de la parcelle a été conduite : les scénarios impliquant des digestat se positionnent de façon intermédiaire vis-à-vis des autres scénarios (le point de vigilance porte sur les émissions de nitrates).

2. Résumé en langage vulgarisé de l'impact socio-économique et environnemental

Le projet MétaMétha montre l'intérêt agronomique des digestats issus de méthanisation qui ont permis des rendements similaires à ceux obtenus par une fertilisation minérale en blé et colza. Cependant, la filière blé panifiable demande des taux de protéines dans le grain qui n'ont pu être atteints par une fertilisation 100% organique. A une substitution totale des fertilisants minéraux, un système mixte fréquemment rencontré chez les agriculteurs est à préférer : en complément aux épandages de digestats, le dernier apport de fertilisant est fait en minéral (urée ou ammonitrate).

Au niveau économique, l'absence d'achat d'intrants minéraux compense les surcoûts liés à l'épandage dans le cas étudié (parcellaire proche du méthaniseur). Si les parcelles sont distantes, l'utilisation de produits organiques est défavorable car les contraintes logistiques et le temps de travail augmentent sensiblement.

L'utilisation de digestats présente certains risques environnementaux (gaz à effet de serre, tassement du sol) qu'on peut toutefois limiter par des bonnes pratiques. La volatilisation d'ammoniac en système digestat est notamment supérieure au système fumier-lisier. La séparation de phase réduit ce problème.

3. Article de vulgarisation

MétaMétha - Impact de l'insertion de la méthanisation sur le bilan Carbone et Azote en exploitation polyculture-élevage

La méthanisation¹¹ est un processus biologique de dégradation de la matière organique permettant le traitement de déchets organiques tels que les effluents d'élevage (fumiers, lisiers), les boues de stations d'épuration, les déchets verts et les déchets agroindustriels. Cette dégradation conduit à la production de biogaz (méthane) valorisé comme énergie renouvelable : le gaz est soit utilisé directement, soit brûlé pour produire de l'électricité. La méthanisation produit aussi un résidu (boue), appelé digestat. Ce produit, valorisable en agriculture, est riche car il est constitué de la plupart des

¹¹ La méthanisation est soutenue par l'état via :

- Le plan Énergie Méthanisation Autonomie Azote (EMAA) visant à atteindre 1000 méthaniseurs en France en 2020. <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-energie-methanisation-autonomie-azote>
- L'appel à projet pour créer 1500 méthaniseurs entre 2015 et 2017. <http://energies-centre.regioncentre.fr/home/appels-a-projets/appel-a-projet-methanisation.html>
- L'initiative « 4 pour 1000 » encourage le retour au sol du carbone <https://agriculture.gouv.fr/4-pour-1000-et-si-la-solution-climat-passait-par-les-sols-0>

nutriments provenant des déchets entrant dans le méthaniseur. Il possède notamment beaucoup d'azote (N), qui est le principal élément dont ont besoin les plantes et qui est le principal engrais de synthèse appliqué dans les champs. Le digestat apporte aussi de la matière organique au sol, ce qui garantit la fertilité et favorise la vie du sol. Cette technologie permet donc de participer à l'autonomie énergétique des territoires (électricité et fertilisants produits localement).

En introduisant la méthanisation dans les exploitations polyculture-élevage, on remplace les effluents d'élevage comme le fumier et le lisier, et une partie des fertilisants de synthèse par les digestats. Le projet MétaMétha a donc pour but de savoir comment utiliser les digestats par rapport aux autres produits, de préciser quel est le pouvoir fertilisant du digestat pour les cultures. La capacité à maintenir ou augmenter la teneur des sols en humus stable est aussi étudiée, tout comme leurs impacts sur l'environnement (nitrates, ammoniac, gaz à effet de serre), toujours en comparaison des autres engrais.

Le projet MétaMétha a consisté à épandre sur des parcelles agricoles cultivées en colza ou en blé, différents produits (effluents d'élevage ; digestats ; fertilisants de synthèse) pour comparer les effets de chacun. Travailler en « grandeur nature » permet d'étudier le système dans son ensemble et d'appréhender des phénomènes comme les émissions de gaz à effet de serre et le lessivage des nitrates, et de tenir compte des contraintes agricoles. On s'intéresse ici au maximum de facteurs à la fois. Cette démarche est complémentaire d'autres études à différentes échelles qui portent sur un nombre limité de facteurs étudiés. Sur le terrain, on effectue à la fois des mesures à l'aide d'équipements scientifiques (ex : sondes mesurant l'humidité du sol) et des prélèvements d'échantillons d'eau, de terre ou de gaz qui sont ensuite analysés en laboratoire.

Les résultats obtenus, complétés par des résultats simulés par modélisation, ont permis d'aboutir au bilan azoté pour chaque parcelle afin d'évaluer la quantité d'azote apportés par les produits que l'on retrouve dans le sol et dans l'eau sous forme de nitrates, dans l'air sous forme de gaz ou encore dans la plante cultivée.

Le projet MétaMétha montre l'intérêt agronomique des digestats issus de méthanisation qui ont permis des rendements similaires à ceux obtenus par une fertilisation minérale en blé et colza. Cependant, la filière blé panifiable demande des taux de protéines dans le grain qui n'ont pu être atteints en fertilisant seulement avec les digestats. Pour atteindre un taux de protéine suffisant il est préconisé de réaliser un apport tardif (sur culture plus haute) en azote minéral.

En utilisant les digestats (déchets présents sur l'exploitation), l'agriculteur réalise des économies en achetant moins de fertilisants. Les surcoûts liés à l'épandage contraignant des digestats sont compensés lorsque le méthaniseur est proche de l'exploitation (comme dans notre étude), dans le cas contraire l'utilisation de produits organiques est défavorable car les contraintes logistiques et le temps de travail augmentent fortement.

En suivant les bonnes pratiques (fractionner les apports de digestats à doses raisonnées, utiliser un matériel adapté, travailler aux bonnes dates), on peut limiter les risques environnementaux (gaz à effet de serre, tassement du sol, nitrates) inhérents à l'utilisation des produits organiques. Les conséquences sur la biodiversité (vers de terre) encore à l'étude semblent limitées.

Projet soutenu par la Région Centre-Val de Loire
dans le cadre de son Appel à projets de recherche d'intérêt régional annuel

1. Liste des unités de recherche, équipes et personnes effectivement impliquées dans le projet

UNITE DE RECHERCHE	NOM Prénom	GRADE	Domaine d'application
INRA UR SOLS	HENault Catherine	DR	coordination
INRA UR SOLS	COUSIN Isabelle	DR	coordination
INRA UR SOLS	PASQUIER Catherine	IE	géomatique
INRA UR SOLS	SEGER Maud	IE	géophysique
INRA UR SOLS	GIROT Ghislain	IE	pédologie
INRA UR SOLS	GIOT Guillaume	AI	mesures physiques
INRA UR SOLS	AYZAC Adeline	AI	chimie analytique
INRA UR SOLS	LE LAY Christian	AI	échantillonnage
INRA UR SOLS	LALOUA Didier	TR	échantillonnage
INRA UE PAO	SAVOIE Antoine	AI	coordination
INRA UE PAO	MAIGNANT Philippe	AT	travaux agricoles
INRA UE PAO	GLAUME Valentin	AT	échantillonnage
INRA UE PAO	ALVES DE SOUZA Lissandra	AT	échantillonnage
INRA UE PAO	DUCHENE David	TR	échantillonnage
UMR ECOSYS	HOUOT Sabine	DR1	coordination
UMR ECOSYS	MOINARD Victor	Doctorant	analyse données
UMR ECOSYS	ESNAULT Baptiste	TR	chimie analytique
UMR ECOSYS	LEMEKHOVA Anastasiia	M2	analyse données
UMR ECOSYS	VOYLOKOV Polina	CDD IE	analyse données
UMR ECOSYS	GOUBARD-DELAUNAY Yolaine	AI	chimie analytique
UMR ECOSYS	SERRE Valentin	TR	chimie analytique
UMR ECOSYS	VACHET Eric	AT	chimie analytique
UMR ECOSYS	ETIEVANT Véronique	TR	écotoxicologie
BU INRA Transfert	CAROZZI Marco	IR	analyse données
CA45	LEJARS Laurent		conseil agricole
CA37	BERSONNET Christophe		conseil agricole
EVEA	GOBILLION Océanne		modélisation ACV
EVEA	GIARD Lucas		modélisation ACV
CVBN	DESSARD Antoine		méthaniseur

2. Bilan des travaux réalisés

A. Acquisition de références au champ

A1 Enquêtes auprès des agriculteurs (livrable L1.1)

Au début du projet, la chambre d'agriculture du Loiret (CA45) a effectué une enquête auprès de 13 agriculteurs de la Région Centre Val de Loire, qui possèdent un méthaniseur et/ ou qui épandent des digestats sous 3 formes (brut, phase liquide, phase solide). Les résultats de l'enquête (livrable L1.1) ont permis d'orienter les modalités expérimentales prévues dans le projet et de choisir les cultures les plus représentatives à implanter.

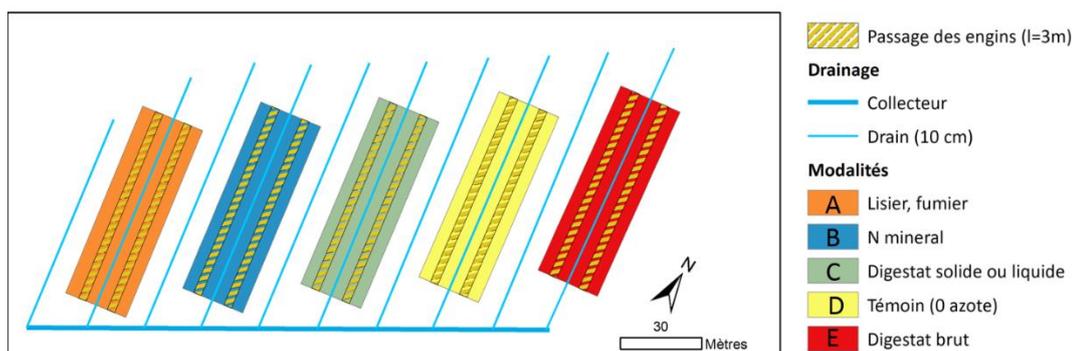
A2 Mise en place du dispositif et équipement du dispositif et équipements des parcelles

Le dispositif de mesures, décrit dans le livrable L1.2, a été installé par l'UE PAO à l'automne 2016, il se situe sur le domaine expérimental de l'INRA de Nouzilly (WGS84 : lat. N 47.541° ; long. E 0.792°).

Il est composé de 5 parcelles, représentant chacune un système :

- La parcelle A, conduite avec du fumier bovin en fin d'été et du lisier bovin en sortie d'hiver et printemps, représentant l'agriculteur ne possédant pas encore de méthaniseur.
- La parcelle B, conduite en azote minéral (témoin), représentant l'agriculteur voisin, futur client pour le digestat excédentaire.
- La parcelle C, conduite avec du digestat solide apporté en fin d'été et du digestat liquide en sortie d'hiver, représentant l'agriculteur possédant un méthaniseur.
- La parcelle D, témoin, ne recevra aucun apport azoté durant toute la durée de l'essai.
- La parcelle E, conduite avec du digestat brut, représentant l'agriculteur possédant un méthaniseur sans séparateur de phase du digestat

La rotation culturale sur les 3 années de suivi est : Blé tendre d'hiver 2017 /Colza 2018 /Blé tendre d'hiver 2019



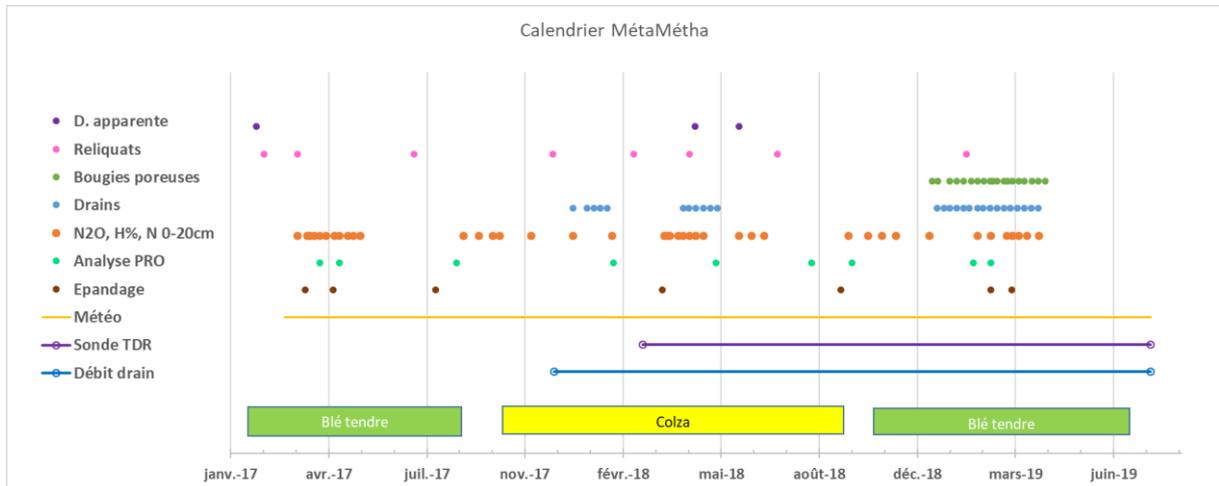
Les parcelles ont été équipées pour suivre de suivre les différents flux d'azote dans les différents compartiments (air, eau et sol. Le dispositif de mesures est plus largement décrit dans le livrable L1.2.

A3 Suivi expérimental

La figure ci-dessous représente toutes les mesures effectuées pendant la durée du projet :

- Sol : densité apparente, humidité du sol massique et par sonde TDR,
- Prélèvement de sol : reliquats azotés (3 périodes), reliquats azoté 0 à 20 cm,

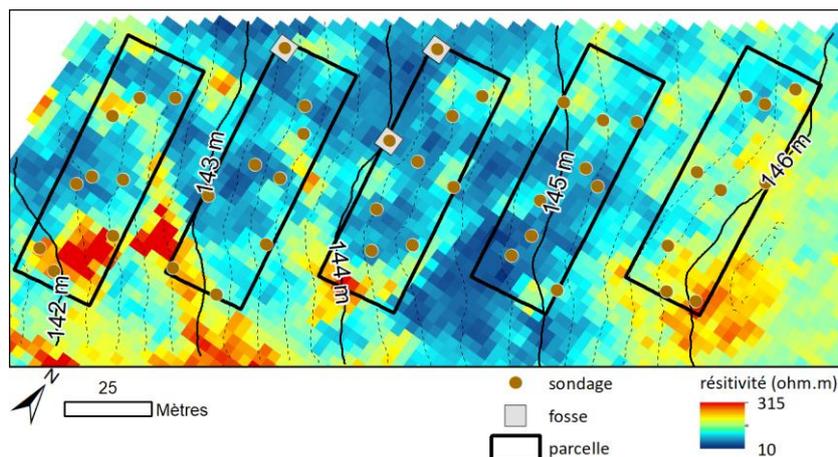
- Prélèvement d'eau du sol : bougies poreuses (0 à 70 cm), eaux des drains,
- Environnement : suivi météorologique, débit de drainage
- Epanchages réalisés s'accompagnant de prise d'échantillons



B. Caractérisation du système étudié

B1 Caractérisation initiale du site d'étude (livrable L2.1)

Une campagne de mesures de la résistivité électrique a été conduite sur le dispositif expérimental. Cette prospection offre une première caractérisation des sols du site. En complément, une campagne de 45 sondages, soit 180 prélèvements de sols, est conduite en janvier 2018. Les échantillons de sols sont analysés par le © INRA LAS (texture, carbone, azote, CEC). Enfin l'ouverture de 3 fosses pédologiques a permis d'équiper le sol de sondes de mesures en continu de la température et de l'humidité du sol. Les profils de sols ont été décrits dans la base de données DONESOL © INRA INFOSOL et des prélèvements ont permis de déterminer, au laboratoire, les capacités de rétention en eau du sol © INRA UR SOLS. Des tests menés par l'UR SOLS ont permis de qualifier la capacité de réduction en N₂O des sols du dispositif.



B2 Caractérisation des effluents (livrable L2.2)

Le projet MétaMéth s'est focalisé sur l'étude de 5 PRO produits sur le site de l'INRA de Nouzilly : un fumier bovin (amendant organique), un lisier bovin (fertilisant organique), un digestat solide (amendant), un digestat brut (amendant ou fertilisant), et un digestat liquide (fertilisant). Premièrement, des analyses physico-chimiques standards ont été faites à chaque épanchage (6 à 13

analyses par PRO). Ensuite, la stabilité de la matière organique apportée par les PRO a été étudiée grâce à des incubations en laboratoire et à un fractionnement chimique. Enfin, une analyse des contaminants (PCB, HAP, NP, et ETM) a été réalisée pour chaque PRO. Les résultats se trouvent dans le livrable L2.2.

Les produits solides sont plus riches en MO, phosphore, et potasse, et les PRO liquides sont plus riches en azote minéral. Les trois digestats possèdent en général des teneurs en contaminants plus fortes que les effluents bovins (provenant d'autres déchets dans le digesteur). Le fumier procure au sol une matière organique plus stable que le digestat solide.

B3 Caractérisation du méthaniseur (livrable L4.2_L4.3)

Sur le site de l'INRA de Nouzilly (Centre Val-de-Loire), un méthaniseur (procédé mésophile, infiniment mélangé, cogénération) traite les effluents d'élevage et des matières extérieures additionnelles depuis 2014 (jusqu'à 12000T d'intrant autorisés par an i.e. 65 jours).

Ce méthaniseur est une ICPE soumise à autorisation. La puissance du moteur (cogénération) est de 250kW électrique et 219kW thermique. Le volume des cuves est de 1600m³ (principale) et 700m³ pour la cuve de maturation. Le temps moyen de séjour dans les cuves est respectivement de 70 et 28 jours. Le volume de stockage de la lagune liquide est 3500m³.

C. Suivi des flux de N au champ (livrable L3.1)

C1 Mesures des reliquats N minéral dans les sols

Des prélèvements de sol sur 0-120 cm sont réalisés à des moments clés du cycle de l'azote dans le sol : à l'entrée d'hiver, à la sortie d'hiver et juste après la récolte. Les analyses des teneurs en azote minéral (NO₃ et NH₄) sont réalisées par la chambre d'agriculture du Loiret.

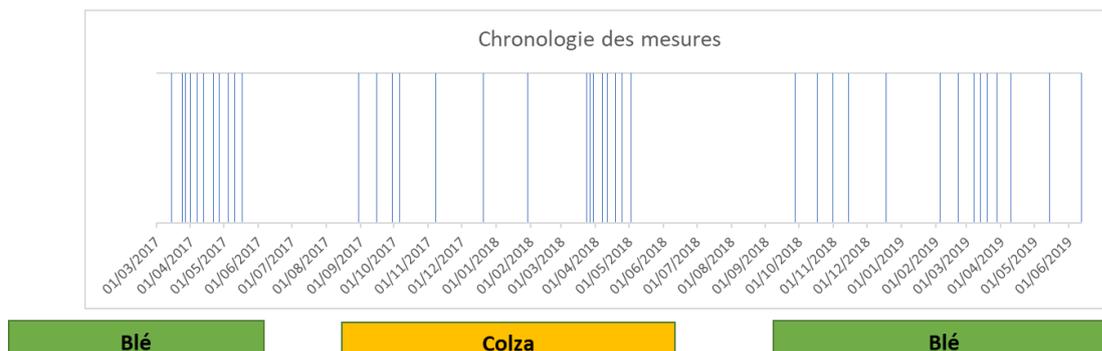
En parallèle à chaque campagne de mesures des émissions de N₂O, l'horizon de surface est prélevé sur 0-20 cm afin d'y suivre l'évolution de l'azote minéral, les analyses sont effectuées par l'unité ECOSYS.

C2 Mesures des flux de NO₃

Les débitmètres ont été installés en janvier 2017, nous avons enregistré les 1eres mesures de débit en novembre 2017, cependant les regards qui accueillent les débitmètres et les préleveurs ont été inondés une grande partie de l'hiver et le système n'a pas permis d'enregistrer des mesures coordonnées entre les préleveurs et les débitmètres. L'ajout d'une année à l'expérimentation a permis d'obtenir des données de concentrations d'azote nitrique en même temps que des mesures de débit en période hivernale (2018-2019). En moyenne 20% de l'eau de pluie a été drainée.

C3 Mesures des flux de N₂O

Les flux de N₂O ont été mesurés environ 12 fois au cours du cycle cultural sur des chambres statiques par accumulation sur 1h30. Les mesures de concentration de N₂O sont réalisées au laboratoire de l'UR SOL sur un chromatographe à phase gazeuse. Les mesures sont plus fréquentes après les opérations de fertilisation qui suggèrent des pics d'émissions.



C4 Mesures de la volatilisation de NH₃

Les émissions d’ammoniac (NH₃) ont été mesurées après chaque campagne d’épandage (5 épandages de PRO liquides, 2 épandages de PRO solides) sur 1 semaine à pas de temps variables en augmentant la fréquence de mesure les jours suivants l’épandage. La méthode utilisée est une mesure par badges alpha et modélisation inverse FIDES. Le facteur d’émission d’ammoniac du digestat liquide est deux fois plus élevé que celui du lisier (pH basique et forte concentration en azote minéral). La séparation de phase du digestat favorise la diminution des émissions d’ammoniac, car le digestat liquide s’infiltré mieux dans les sols que le digestat brut. Une grande proportion de l’azote ammoniacal des PRO solides se volatilise (épandage d’été avec de fortes températures), malgré leur teneur en N ammoniacal est faible. Les flux d’ammoniac sont équivalents lors d’un épandage d’été et un épandage d’hiver. Les conditions d’épandage (météo, enfouissement), influe fortement les émissions.

C5 Mesures de N absorbé par la plante

Avant chaque récolte (blé 2017, colza 2018, blé 2017), des échantillons de grains et biomasse aérienne ont été prélevés pour déterminer leur teneur en carbone et en azote. L’intérêt est notamment de connaître la quantité d’azote exportée par la plante pour faire des bilans azotés.

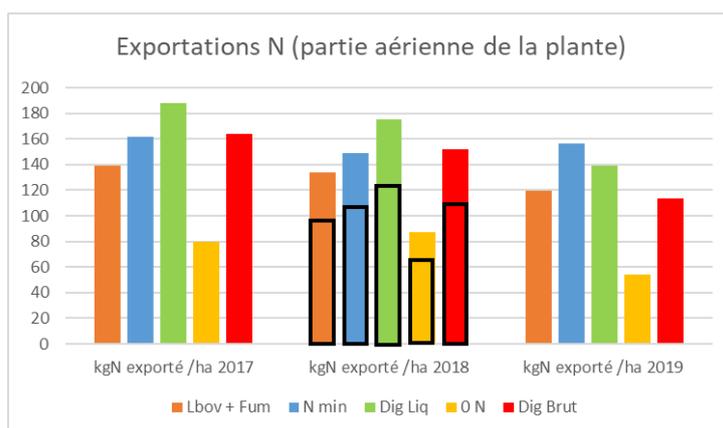


Figure : exportation d’azote par la plante par modalité et par an

La quantité d’azote exportée par hectare dépend bien sûr des rendements de chaque modalité. L’intérêt de cette mesure est de rapporter les exportations aux quantités d’azote épandues dans chaque parcelle.

D. Analyse des données

D1 Bilan azote des différentes modalités (Livrable L4.1)

Les différents flux d’N mesurés pendant l’expérimentation (N du sol, N lixivié, NH₃, N₂O, N dans la plante) ont été analysés. Le jeu de données acquis a servi à paramétrer et à calibrer le modèle de culture STICS. Un bilan des flux d’azote minéral entrants et sortants à l’échelle de la rotation a donc pu être approché grâce à la modélisation de flux difficiles à mesurer.

Influx : minéralisation de l’humus, dépôt, fertilisation, minéralisation nette des résidus

Exflux : exportation par les plantes, émissions N₂ et N₂O, NH₃, lixiviation, immobilisation nette des résidus

D2 Bilan carbone des différentes modalités (Livrable L2.2)

Le bilan carbone est inclus dans l’Analyse de Cycle de Vie (ACV) décrit ci-dessous à travers de l’indicateur Changement climatique. Cet indicateur représente la quantification des émissions de gaz à effet de serre (CO₂, méthane...) qui contribuent au phénomène de réchauffement climatique à l’horizon de 100 ans. Il est exprimé en kg de CO₂ équivalent.

Le stockage de carbone organique dans le sol a également été étudié et les résultats sont présentés dans le livrable L2.2. La modélisation des scénarios à partir des analyses effectuées sur les PRO épandues pendant l’essai donnent les résultats suivants :

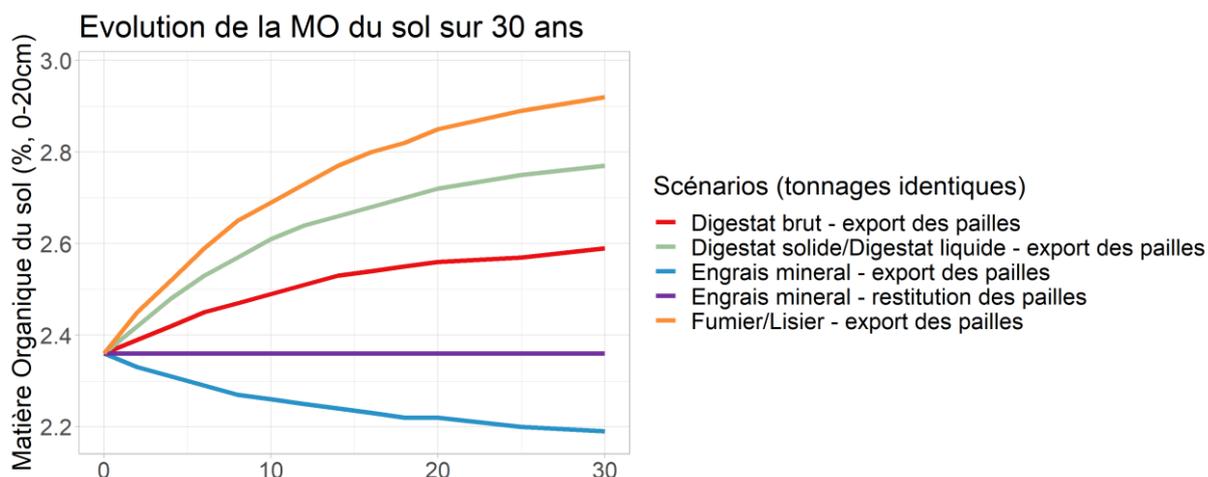


Figure : Modélisation AMG du carbone du sol : simulation sur 30 ans selon différents scénarios

D3 Analyse de Cycle de Vie (Livrable L4.2_4.3)

L’analyse de cycle de vie a été confiée au bureau d’étude EVEA. EVEA a remis un rapport d’étude correspondant aux livrables L4.2, L4.3 et L4.4. Il présente l’ensemble des résultats, hypothèses et méthodologie utilisés pour l’ACV.

L'objet de cette ACV était de comparer différents scénarios de traitement et d'épandage d'effluents afin de mieux connaître les forces et les faiblesses de l'épandage de digestats (brut ou solide et liquide) issus de la méthanisation. Ce scénario de référence a été comparé à des scénarios alternatifs : épandage de lisier et fumier composté et de lisier, d'effluents bruts (fumier et lisier) et d'engrais minéral. Le cycle de vie entier a été étudié sur sept indicateurs environnementaux. Une attention particulière était portée sur les impacts liés à une mauvaise maîtrise des pertes azotées, dues à la volatilisation de l'azote ammoniacal ou à la lixiviation des nitrates.

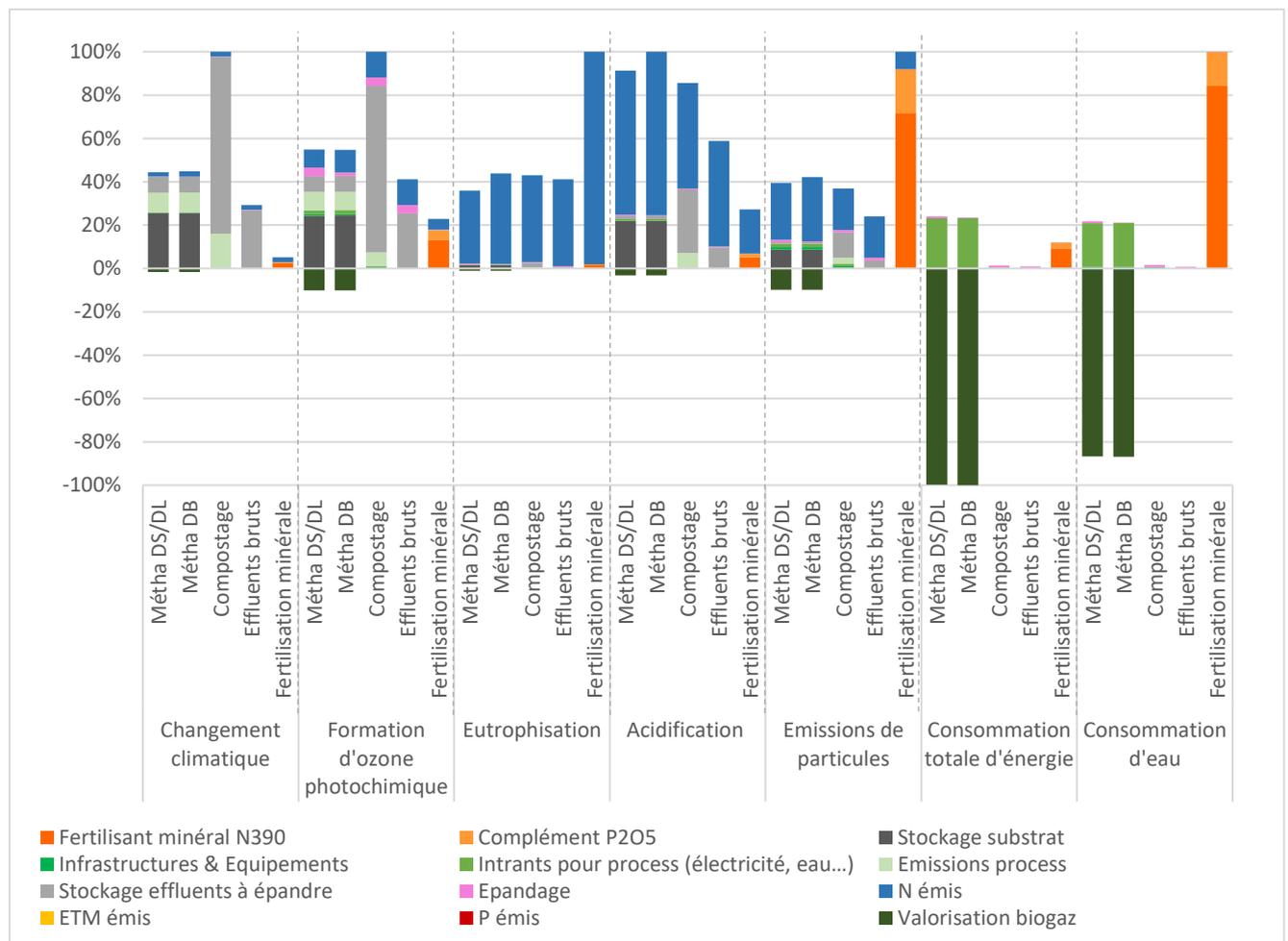


Figure : Comparaison des scénarios sur les 7 indicateurs choisis pour l'ACV.

Les résultats de l'étude indiquent que les scénarios de méthanisation se positionnent de façon intermédiaire vis-à-vis des autres scénarios. Les émissions de nitrates en font le pire scénario pour l'acidification alors que la valorisation énergétique en fait le meilleur en consommation d'eau et d'énergie.

Les impacts totaux de la méthanisation pourraient être améliorés en prenant compte que ce procédé permet de traiter d'autres intrants que les effluents d'élevage (boues de stations d'épuration des eaux usées par exemple). Les impacts liés au traitement de ces intrants ainsi évités ne sont pas pris en compte dans l'étude.

D4 Inventaire de l'ensemble des flux réalisés pour l'ACV (Livrable L4.4)

Le bureau d'étude EVEA a fourni un tableur compilant l'inventaire des données utilisées pour l'ACV ainsi qu'un fichier issu du SimaPro 9 (logiciel utilisé pour la réalisation de l'ACV).

D5 Enregistrement et étude du temps de travail et des aspects logistiques (Livrable L4.5)

En se basant sur le référentiel « barème d'entraide » des Chambres d'agriculture, nous avons estimé les coûts complets du passage des différents matériels d'épandage des PRO ou de l'azote minéral utilisés sur l'essai. Ces coûts ont été multipliés par le nombre de passages des matériels dans chaque système pendant les 3 ans afin d'estimer les coûts à la rotation.

Cela nous a permis d'obtenir des coûts d'épandage pour 1 m³ de PRO et aussi une estimation du coût d'épandage d'une unité (kg) d'azote total dans chaque système étudié. Par exemple, l'azote minéral est 5 fois moins coûteux à épandre que le fumier et 4 fois moins coûteux à épandre que le digestat liquide. Cependant, si on tient compte du prix d'achat des fertilisants minéraux (N, P, K), les charges pour la fertilisation sont, dans le système sans apport de PRO, supérieures aux charges d'épandage dans les systèmes avec PRO (effluents bruts ou digestats) d'environ 100 € par ha et par an.

Une étude complémentaire, cette fois à l'échelle de l'exploitation, a été conduite pour étudier l'impact de l'éloignement des parcelles et le choix du matériel d'épandage sur les coûts et le nombre de jours nécessaires pour l'épandage du digestat.

SYNTHESE DES TRAVAUX REALISES

Le projet MétaMétha vise à décrire les conséquences de l'introduction de la méthanisation à l'échelle de la parcelle agricole. Différents PRO sont épandus sur des parcelles représentant des systèmes agricoles avant ou après l'installation d'un méthaniseur sur l'exploitation. On épand (1) des effluents bruts (lisier et fumier bovins), (2) du digestat brut, (3) des digestats liquide et solide (présence d'une séparation de phase), (4) des engrais minéraux : une solution azotée N390 (le témoin).

Les résultats des analyses de PRO étudiés confirment la distinction entre les produits fertilisants riches en azote et les produits ayant davantage un statut d'amendement du sol de par leur richesse en MO et en éléments tels que P et K. Après séparation de phase, le digestat liquide est classé comme fertilisant et le digestat solide est un produit amendant.

L'étude de la stabilité de la matière organique des PRO montre qu'il est possible de substituer un effluent brut (lisier ; fumier) par un digestat (liquide ; solide) sans compromettre le bilan humique de l'exploitation. Le digestat solide étudié possède toute de même une part de carbone stable inférieur au fumier bovin. Des apports répétés de fumier permettraient d'augmenter plus rapidement le stock de carbone organique du sol que des apports de digestats solides (résultats du modèle AMG).

Les trois digestats possèdent en général des teneurs en contaminants (PCB, HAP, NP, et ETM) plus fortes que les effluents bovins (provenant d'autres déchets dans le digesteur). Cela est dû à certains intrants du méthaniseur (boue de station d'épuration par exemple).

En début de projet, afin proposer une expérimentation reflétant les pratiques agricoles du terrain (type et doses de PRO épandus, rotation des cultures), une enquête auprès des agriculteurs méthaniseurs de la région Centre Val-de-Loire a été réalisée. Une rotation colza-blé-blé a été choisie. Les PRO dits amendants sont épandus l'été avant colza et le premier blé, les PRO dits fertilisants sont épandus en sortie d'hiver sur les 2 cultures.

Les rendements agricoles (t/ha) atteignent globalement les objectifs fixés pour les parcelles conduites en digestat. Cependant, la qualité des récoltes de blé tendre d'hiver n'est pas conforme aux attentes de la filière blé panifiable pour le taux de protéine des grains ce qui entraîne un déclassement de la production et une baisse non soutenable du prix de vente. Cela s'explique principalement par l'impossibilité d'épandre des PRO avec une tonne à lisier au bon stade. Techniquement, la substitution des engrais minéraux par les digestats ne peut donc être totale. Une fertilisation mixte basée sur l'apport de digestats mais complétée au « dernier apport » par un engrais minéral est déjà la solution privilégiée par les agriculteurs enquêtés pour le projet.

Dans le cas théorique étudié d'une substitution totale des engrais minéraux, il est possible pour l'agriculteur de réaliser une légère économie (environ 100€/ha.an) dans l'hypothèse d'un parcellaire (plan d'épandage) regroupé à proximité des lieux de stockage des digestats. L'éloignement des surfaces épandues est fortement défavorable pour les systèmes utilisant les PRO.

En ce qui concerne les impacts environnementaux, le projet s'est concentré sur les flux azotés. La modélisation de certains flux azotés difficiles à mesurer a complété les résultats obtenus par mesure afin d'aboutir à un bilan azoté des différents systèmes. La différence la plus importante observée entre les systèmes est le fait que le lisier étant moins riche en azote, les risques environnementaux sont réduits, notamment la volatilisation.

Les résultats de l'ACV indiquent que les scénarios de méthanisation se positionnent de façon intermédiaire vis-à-vis des autres scénarios. Les émissions de nitrates en font le pire scénario pour l'acidification alors que la valorisation énergétique en fait le meilleur en consommation d'eau et d'énergie. Les impacts totaux de la méthanisation pourraient être améliorés en prenant compte que ce procédé permet de traiter d'autres intrants que les effluents d'élevage (boues de stations d'épuration des eaux usées par exemple). Les impacts liés au traitement de ces intrants ainsi évités ne sont pas pris en compte dans l'étude.

3. Conclusion générale

Originalité et limites

L'originalité du projet MétaMétha réside dans son approche systémique pour répondre tant aux questionnements sur les bilans de l'azote et du carbone qu'à d'autres aspects tels que les contraintes logistiques de l'utilisation des digestats. Seules des mesures sur des parcelles expérimentales de relativement grande taille permettent d'appréhender des phénomènes comme la volatilisation ou la lixiviation. L'approche choisie présente cependant des limites dans la comparaison des systèmes. Des parcelles de grande taille peuvent être hétérogènes du point de vue pédoclimatique et hydrologique entre elles ou au niveau intra-parcellaire. Des effets cumulatifs pluriannuels font dériver l'état initial, à court terme (ex. arrière effet de l'épandage de fumier) et à long terme (évolution du sol). L'étude de phénomènes annuels peut alors être plus adaptée sur un dispositif analytique garantissant « toutes choses égales par ailleurs ». En d'autres termes, on ne peut réellement comparer les pratiques annuelles effectuées sur chaque parcelle entre elles que la première année. Par ailleurs, le dispositif MétaMétha n'a pas de répétitions sur d'autres parcelles, seulement des répétitions intra-parcellaires des mesures. Enfin, pour étudier des flux tels que les émissions de N_2O provenant d'un type de PRO, le choix a été fait de ne conduire chaque parcelle qu'en fertilisation organique ou fertilisation minérale, alors que la pratique agricole répandue est un système mixte (PRO + engrais minéral).

Principaux résultats du projet

A la fin du projet, nous avons un dispositif caractérisé et équipé sur lequel continue les épandages différenciés. 3 années de mesures ont généré un jeu de données accessible à la communauté scientifique et permettant notamment d'entreprendre des travaux de modélisation. Les données concernant la volatilisation de l'ammoniac provenant des digestats sont en particulier précieuses car elles sont rares à cette échelle. Le bilan azoté donne une vision de l'ensemble des flux. La caractérisation des PRO (qualité de la MO par rapport à un fumier) et la modélisation AMG a permis d'envisager les conséquences de l'épandage de digestats à long terme sur la MO du sol. Ces travaux ont été complétés par une étude de type ACV sur l'épandage de PRO à la parcelle et par une étude économique évaluant le coût d'épandage des digestats et leur intérêt économique relatif aux intrants minéraux. Enfin, le projet a mis en relation différents acteurs chercheurs, conseillers et agriculteurs autour du développement de la méthanisation en région Centre Val-de-Loire.

Principales conclusions vis-à-vis de l'utilisation du digestat

Aspects environnementaux :

- Emissions d'ammoniac gazeux (NH_3) : le système digestat solide et liquide a des pertes en NH_3 (en pourcentage de l'azote apporté) 2 fois supérieures au système lisier/fumier. Cela est dû à une plus forte concentration en NH_4^+ et à un pH élevé des digestats. La séparation de phase (solide/liquide) diminue la volatilisation d'ammoniac car le digestat liquide s'infiltré mieux dans le sol que le digestat brut. La volatilisation d'ammoniac s'est montrée très variable selon les années et les conditions d'application. La volatilisation est fortement favorisée par des conditions venteuses, chaudes, et sèches. Pour ne pas être sujets à trop de volatilisation, les digestats doivent être épandus dans de bonnes conditions et si possible enfouis immédiatement (le plus rapidement possible) car la volatilisation intervient dans les heures qui suivent l'épandage.

- Emissions de protoxyde d'azote (N₂O) : Les pertes en N₂O sont en moyenne inférieure à 1% pour tous les systèmes. Le témoin minéral présente les émissions les plus importantes. Mais en pourcentage de l'azote épandu, c'est le système lisier/fumier qui émet le plus.
- Lixiviation : les pertes azotées les plus importantes sont observées suite aux apports d'été ou d'automne effectués avec le semis des céréales d'hiver. Les flux sont nettement réduits pour le colza. Les facteurs météorologiques (précipitations) et pédologiques (capacité au champ) jouent un grand rôle dans les quantités d'azote lixiviées.
- MO du sol : Le digestat solide et le fumier apportent 2 fois plus de matière organique stable au sol que les PRO liquides. La simulation à 20 ans montre un stockage légèrement inférieur dans le système digestat par rapport au système fumier/lisier. L'utilisation de digestat ne semble donc pas mettre en péril les stocks de MO dans les sols. Dans le système digestat brut, le stockage est inférieur car les quantités apportées ne permettent pas d'apporter autant de MO stable au sol.
- Tassement du sol : une vigilance doit être portée sur ce point car les capacités de stockage des PRO liquides peuvent conduire les agriculteurs à épandre sur des sols peu portants. Des alternatives techniques (« cordon ombilical ») se diffusent chez les agriculteurs. Elles rendent l'accès aux parcelles possible pour des épandages relativement précoces en sortie d'hiver en limitant le poids du matériel agricole.

Aspects économiques :

- La fertilisation des cultures par les digestats permet d'atteindre des rendements corrects (proches de ceux de la parcelle témoin). Le digestat liquide qui contient plus d'azote minéral que le lisier possède une valeur fertilisante supérieure. Les digestats sont donc agronomiquement intéressants. Mais pour le blé, les taux de protéine obtenus avec les PRO sont trop faibles. Pour répondre au cahier des charges de la filière blé panifiable, il ne semble pas possible de substituer à 100%, les digestats aux engrais minéraux. On peut tout de même en substituer une bonne partie (variable selon les situations des agriculteurs). Comme le pratique fréquemment les agriculteurs, un système mixte est préférable : le dernier apport de fertilisant (qui permet d'augmenter le taux de protéines dans le grain) est fait en minéral (urée ou ammonitrate).
- Au niveau économique, dans le cas d'un parcellaire (plan d'épandage) regroupé autour du méthaniseur, l'économie d'intrants s'équilibre avec les surcoûts liés à l'épandage. Les aspects logistiques sont très importants. Si les parcelles sont distantes, l'utilisation de produits organiques devient défavorable : le coût/m³ épandu et surtout le nombre de jours nécessaires pour l'épandage augmentent.