

Performances agronomiques et environnementales de la méthanisation agricole dans un contexte de grandes cultures céréalières (sans élevage) et recommandations de bonnes pratiques

Sophie Carton (AgroParisTech), Florent Levavasseur (Inrae)

Rapport final

Février 2022

Étude commandée par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA), financée par le programme 215 du MAA. Ce document n'engage que ses auteurs et ne constitue pas nécessairement le point de vue du MAA. Marché n° SSP-DRIAAF-2020-038

AgroParisTech 



Table des matières

1	Introduction.....	6
2	Matériel et méthodes.....	10
2.1	Méthodologie générale.....	10
2.2	Synthèse bibliographique.....	10
2.2.1	Bibliographie scientifique.....	10
2.2.2	Bibliographie technique.....	10
2.3	Enquête auprès de méthaniseurs agricoles franciliens.....	10
2.4	Prélèvement de digestats pour analyse.....	11
2.5	Simulation des performances à la parcelle.....	11
2.5.1	Outil PROLEG.....	11
2.5.2	Définition des scénarios à simuler.....	12
2.6	Modélisation du système global.....	13
2.6.1	Objectifs spécifiques.....	13
2.6.2	Présentation de l’outil PerfAgroP3.....	13
2.7	Elaboration de préconisations de suivi et de recommandations d’usage.....	15
3	Synthèse bibliographique.....	16
3.1	Impacts agronomiques.....	16
3.1.1	Production de biomasse.....	16
3.1.2	Pouvoir méthanogène des biomasses végétales.....	16
3.1.3	Gestion de la fertilisation.....	16
3.1.4	Gestion de l’eau.....	17
3.1.5	Travail du sol.....	17
3.1.6	Protection phytosanitaire.....	18
3.2	Impacts sur la qualité du sol.....	18
3.2.1	Carbone organique.....	18
3.2.2	Vie du sol.....	19
3.2.3	Couverture des sols et érosion.....	19
3.2.4	Compaction du sol.....	19
3.3	Impacts environnementaux.....	19
3.3.1	Lixiviation de nitrates.....	19
3.3.2	Volatilisation ammoniacale.....	20
3.3.3	Emissions de protoxyde d’azote au champ.....	21
3.3.4	Odeurs.....	21
3.3.5	Bilan énergétique.....	21
3.3.6	Bilan gaz à effet de serre.....	22

3.4	Synthèse et identification des besoins de recherche.....	22
4	Résultats d'enquêtes.....	25
4.1	Profils de fermes.....	25
4.2	Profils des méthaniseurs.....	25
4.3	Principaux changements dans les systèmes de production liés à la mise en place de la méthanisation.....	27
4.3.1	Changements dans l'assolement : cultures principales.....	27
4.3.2	Les types de CIVE.....	27
4.3.3	La production de CIVE d'hiver.....	28
4.3.4	La production de CIVE d'été.....	28
4.3.5	La production de cultures dédiées.....	29
4.3.6	L'épandage des digestats.....	30
4.3.7	Autre fertilisation organique.....	30
4.4	Autres impacts et enjeux soulevés.....	30
4.5	Conclusion du travail d'enquêtes.....	31
5	Caractérisation des digestats.....	32
5.1	Analyses physico-chimiques.....	32
5.2	Indice de stabilité de la matière organique.....	32
5.3	Cinétique de minéralisation.....	33
5.4	Apports de nutriments.....	34
6	Simulation des performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture ...	36
6.1	Définition des scénarios.....	36
6.1.1	Type de sol.....	36
6.1.2	Données climatiques.....	36
6.1.3	Assolement et succession de cultures.....	36
6.1.4	Conduite des CIVE d'été.....	39
6.1.5	Conduite des CIVE d'hiver.....	39
6.1.6	Cultures dédiées.....	40
6.1.7	Travail du sol.....	41
6.1.8	Interculture hors CIVE.....	41
6.1.9	Epandage de digestats.....	41
6.1.10	Fertilisation minérale azotée des cultures principales.....	41
6.1.11	Fertilisation minérale PK.....	41
6.1.12	Autre fertilisation organique.....	42
6.1.13	Protection phytosanitaire hors CIVE.....	42
6.1.14	Irrigation hors CIVE.....	42

6.1.15	Objectif de rendement des cultures principales	42
6.1.16	Récapitulatif des scénarios de modélisation	43
6.2	Résultats de simulation	43
6.2.1	Diversité des familles cultivées	43
6.2.2	Diversité des périodes d'implantation	44
6.2.3	Durée en sol nu.....	45
6.2.4	Production de biomasse (selon les objectifs de rendement).....	46
6.2.5	Variabilité des biomasses de CIVE simulées et des cultures suivantes	46
6.2.6	Entrées de carbone et stockage de carbone	49
6.2.7	Effets sur la fertilité du sol.....	50
6.2.8	Consommation d'engrais N	51
6.2.9	Bilan PK.....	52
6.2.10	Drainage et recharge des nappes.....	53
6.2.11	Pression phytosanitaire	54
6.2.12	Lixiviation d'azote.....	55
6.2.13	Volatilisation ammoniacale	56
6.2.14	Emissions de protoxyde d'azote.....	57
6.2.15	Bilan gaz à effet de serre à la parcelle.....	58
6.3	Synthèse à l'échelle parcelle	59
7	Résultats de modélisation à l'échelle ferme	62
7.1	Caractérisation du scenario de base (situation initiale).....	62
7.2	Caractérisation du méthaniseur	63
7.3	Définition des scenarios alternatifs.....	64
7.4	Résultats	65
7.4.1	Etude de l'impact de la méthanisation et du prix de vente du biogaz (métha 1a et métha 1b)	65
7.4.2	Etude de l'intérêt de la culture dédiée (métha 1c et métha 1d).....	67
7.4.3	Etude de l'intérêt des CIVE bas intrants (métha 2a et métha 2b).....	68
7.4.4	Etude de l'intérêt de la diversification de l'approvisionnement du méthaniseur (métha 3 et métha 4)	69
7.4.5	Etude de l'intérêt de l'irrigation d'une CIVE d'été (métha 5).....	71
7.5	Conclusions de la modélisation échelle système	72
8	Elaboration de préconisations de suivi et de recommandations d'usage	74
9	Conclusion générale	75
10	Références.....	77
11	Annexes	81

Résumé

La méthanisation sans élevage se développe en Ile-de-France, notamment adossée à la production de cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) pour alimenter les méthaniseurs. L'objectif de cette étude était de donner des premiers éléments de réponse sur les performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture associés aux méthaniseurs sans effluents d'élevage, dans le contexte francilien, et partant de là, de déterminer les conditions d'un développement vertueux de la méthanisation agricole en Ile-de-France et d'identifier les manques de connaissance. Pour cela, cette étude s'est déroulée en 5 phases : 1) revue de bibliographie scientifique et technique, 2) enquêtes d'exploitations associées à 11 méthaniseurs sans élevage en fonctionnement en Ile-de-France, 3) caractérisation des digestats de ces méthaniseurs, 4) simulation des performances agronomiques et environnementales à l'échelle parcelle et ferme et 5) proposition de recommandations de bonnes pratiques agricoles et de recherches complémentaires.

La première phase de revue de littérature a fait apparaître le peu de connaissances sur le sujet, dans la littérature scientifique comme technique. Cependant, quelques études couvrent une partie du sujet, ou des rapprochements sont possibles avec d'autres types de méthanisation (de cultures dédiées, d'effluents d'élevage). A la fois des effets positifs et négatifs peuvent ainsi être attendus. Dans tous les cas, aucune étude spécifique au contexte francilien n'existe, confirmant l'intérêt de l'étude.

La seconde phase a montré une relative homogénéité des systèmes de culture concernés. Les CIVE principales sont le maïs en été et l'orge en hiver, conduites de façon assez intensives par comparaison à des couverts, tant en termes de fertilisation, de protection phytosanitaire, voire d'irrigation dans certains cas. Les rendements de biomasse obtenus sont plutôt élevés. L'introduction des CIVE amène des changements de cultures principales conséquents (diminution de la sole en blé notamment). Les méthaniseurs enquêtés sont alimentés par une part variable de CIVE (de 15 à 70% environ), le complément étant principalement constitué de déchets ou de coproduits agricoles. Le digestat produit est valorisé principalement sur céréales en sortie d'hiver.

La troisième phase a mis en évidence que les digestats bruts et liquides sont assez proches d'un lisier de porc (bonne valeur fertilisante azotée mais faible contribution à la matière organique des sols). Le digestat solide est plus proche d'un fumier bovin (bon amendement mais faible valeur fertilisante azotée).

A l'échelle de la parcelle, la modélisation a permis de mettre en avant un ensemble d'effets plutôt favorables : production totale de biomasse augmentée, stockage de carbone, économies d'engrais de synthèse (N, P et K) ; des effets plutôt défavorables : volatilisation ammoniacale, pression accrue sur la ressource en eau, réduction de la production de biomasse non dédiée à la méthanisation ; et des effets incertains (pression phytosanitaire) ou neutres (lixiviation de nitrates). A l'échelle de la ferme, la modélisation a mis en évidence l'impact favorable sur le bilan énergétique et les émissions de gaz à effet de serre, sur l'utilisation d'engrais de synthèse et sur la pression phytosanitaire (avec un assolement optimisé). Les bilans nourriciers et la volatilisation ammoniacale sont impactés défavorablement. Les modèles utilisés ne permettent pas de juger de l'impact environnemental du recours à l'irrigation.

Enfin, sur la base des éléments précédents et d'une concertation avec les différents acteurs impliqués dans le suivi de l'étude, un guide a été élaboré. Il contient des recommandations de bonnes pratiques agricoles et des pistes de recherches complémentaires sur la stratégie d'alimentation du méthaniseur, le choix des CIVE, la conduite des CIVE et la gestion du digestat de méthanisation.

Abstract

Agricultural biogas production without livestock effluents is developing in Ile-de-France region, based on the production of cover crops grown as feed-supply for biogas units. The objective of this study was to provide some preliminary details on the agronomic and environmental performances of cropping systems associated with agricultural non-livestock-based biogas units, in the context of Ile-de-France region. Furthermore, it aimed at defining the conditions of a virtuous development of agricultural biogas production in Ile-de-France region and at identifying knowledge gaps. To do so, this study was carried out in 5 phases: 1) scientific and technical literature review, 2) surveys in farms associated with 11 agricultural non-livestock-based biogas units, 3) characterization of digestates, 4) simulation of agronomic and environmental performances at field and farm scale and 5) proposition of best practices and further research recommendations.

The literature review phase underlined the lack of knowledge on the subject in the scientific as well as in the technical literature. However, some studies cover a part of the subject, or relations can be made with other types of biogas production (using dedicated crops or livestock effluents). Positive and negative effects can thus be expected. In any case, no specific study has ever been conducted in the Ile-de-France context, which confirms the relevance of the study.

The second phase showed a relative homogeneity of the cropping systems. The main cover crops grown as feed-supply for the biogas units are maize in summer and barley in winter. They are grown in a relatively intensive way compared to classical cover crops, in terms of fertilization, plant protection, and irrigation in some cases. Biomass yields are rather high. The introduction of such cover crops brings significant changes in main crops (decrease in wheat area, in particular). The surveyed biogas units are fed with a variable share of cover crops (15 to 70% of inputs approximately). The remaining substrates mainly consist in industrial waste or agricultural by-products. The digestate is used mainly to fertilize cereal crops at the end of the winter.

The third phase highlighted the fact that raw and liquid digestates are rather similar to swine liquid manure (good nitrogen fertilizing value but low contribution to soil organic matter). Solid digestate is more similar to bovine solid manure (good organic amendment but low nitrogen fertilizing value).

Field scale modelling highlighted a number of rather positive effects: increase in total biomass production, soil carbon storage, decrease in synthetic fertilizer use (N, P and K); some rather negative effects: ammonia volatilization, increased pressure on water resources, reduction in production of biomass not dedicated to biogas production; and some uncertain effects (phytosanitary pressure) or neutral effects (nitrate lixiviation). Farm scale modelling showed a positive impact on energy balance and greenhouse gas emissions, on fertilizer use and on phytosanitary pressure (provided an optimized crop rotation). Food production and ammonia emissions are negatively impacted. The models aren't able to assess the environmental impact of irrigation.

Finally, based on the information above and on discussions with the various stakeholders involved in the study follow-up, a guide has been developed. It consists in recommendations on best agricultural practices and suggestions for complementary research on the biogas unit supply strategy, the choice of cover crops and digestate management.

1 Introduction

La méthanisation agricole se développe de façon importante en région Ile-de-France, en cohérence avec plusieurs dispositions prises au niveau régional, en particulier le Pacte Agricole (2018) et la stratégie énergie-climat de la région Ile-de-France (2018). L'objectif des politiques publiques au niveau francilien est en particulier d'accompagner le développement de la méthanisation agricole afin de « faire de l'agriculture francilienne la vitrine d'une agriculture économiquement viable et respectueuse de l'environnement ». Cependant, peu de recherches ont été menées sur les conséquences de la méthanisation agricole non adossée à des systèmes d'élevage, qui est la plus répandue en Ile-de-France. Celle-ci se caractérise par le recours à des Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique (CIVE)¹ pour l'alimentation des digesteurs, dans des quantités plus ou moins importantes, complétées par des co-produits agricoles ou agro-industriels, des biodéchets ou des cultures dédiées. Elle induit par conséquent des changements dans les systèmes de production agricole, notamment :

- Le passage d'une partie des surfaces cultivées à de la double culture annuelle, consistant en une culture intermédiaire à vocation énergétique suivie d'une culture de vente ou inversement, ou bien à la production de cultures dédiées pour la méthanisation. Cette transformation s'accompagne de modifications dans la rotation de cultures, mais aussi dans la conduite des cultures (en particulier conduite des cultures intermédiaires et fertilisation).
- Le passage d'une fertilisation essentiellement minérale à l'utilisation parfois très importante de digestat de méthanisation comme fertilisant et amendement organique. Le digestat produit par ce type d'unités de méthanisation sans élevage et ses effets potentiels sont peu connus à l'heure actuelle.

Les interrogations sur les impacts agronomiques et environnementaux de la méthanisation sans élevage concernent en particulier les effets du retour au sol du digestat, les effets de l'exportation de cultures intermédiaires sur l'évolution des stocks de matière organique du sol et les effets divers des changements dans les systèmes de culture et les effets du méthaniseur sur le système de production agricole global, notamment son bilan gaz à effet de serre.

C'est dans ce contexte qu'AgroParisTech et INRAE ont mené une étude intitulée « Performances agronomiques et environnementales de la méthanisation agricole dans un contexte de grandes cultures céréalières (sans élevage) et recommandations de bonnes pratiques », en réponse à l'appel d'offre « Transition vers des systèmes de production durables : gestion durable du foncier agricole, contributions de l'agriculture à une agriculture bas carbone et à la gestion globale de la biomasse » du Programme Ministériel d'études 2020, piloté par la DRIAAF d'Ile-de-France.

L'objectif de cette étude était de donner des premiers éléments de réponse sur les performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture associés aux méthaniseurs sans effluents d'élevage, dans le contexte francilien, et partant de là, de déterminer les conditions d'un développement vertueux de la méthanisation agricole en Ile-de-France et identifier les manques de connaissance. Pour cela, cette étude est partie d'un état des lieux des connaissances scientifiques et techniques sur les impacts agronomiques et environnementaux de la méthanisation agricole sans élevage. Elle s'est ensuite attachée à mieux connaître les changements dans les systèmes de culture, induits par la mise en place de la méthanisation, dans des systèmes de production agricole sans élevage

¹ Culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE) : Une CIVE est une culture implantée et récoltée entre deux cultures principales dans une rotation culturale. Les CIVE sont récoltées pour être utilisées en tant qu'intrant dans une unité de méthanisation agricole. Une CIVE d'hiver est semée à l'automne (octobre) et récoltée au printemps (avril-mai). Une CIVE d'été est semée en été (fin juin-début juillet) et récoltée à l'automne (mi-fin octobre).

en Ile-de-France. Elle s'est aussi intéressée à la caractérisation des digestats produits dans les unités de méthanisation sans élevage d'Ile-de-France. Enfin elle s'est basée sur l'évaluation, de façon prospective, grâce à la modélisation, des effets agro-environnementaux induits par la méthanisation (les mesures au champ étant longues et coûteuses et les systèmes de production encore jeunes). Les enseignements de cette étude, menée dans le contexte très particulier de l'Ile-de-France et avec des outils limités (étude bibliographique, enquêtes de terrain et modélisation) ont permis d'élaborer des recommandations pour le développement de la méthanisation sans élevage et des préconisations de recherche complémentaire.

Ce rapport vise à faire un compte-rendu complet de l'étude. Compte tenu de la méthode de travail employée, les auteurs et les commanditaires ne sauraient être tenus responsables de toute interprétation ou extrapolation des préconisations et résultats présentés au reste du territoire national.

2 Matériel et méthodes

2.1 Méthodologie générale

Cette étude s'est appuyée sur la méthodologie suivante :

- L'étude de l'état de l'art des connaissances scientifiques et techniques sur les impacts agronomiques et environnementaux de la méthanisation agricole sans élevage (dernier trimestre 2020) ;
- La réalisation d'entretiens auprès de 22 agriculteurs impliqués dans les 11 méthaniseurs agricoles sans élevage de la région Ile-de-France (hiver 2020-2021) ;
- La réalisation de prélèvements et d'analyses de caractéristiques et de la dynamique de minéralisation de digestats des méthaniseurs agricoles sans intrants d'élevage visités en Ile-de-France (hiver-printemps 2020-2021) ;
- La modélisation des impacts agronomiques et environnementaux de la mise en place de la méthanisation agricole dans le contexte d'Ile-de-France, à l'échelle de la parcelle (avec l'outil PROLEG) et à l'échelle de l'exploitation agricole (avec l'outil PerfAgroP3) (printemps-été 2021).

2.2 Synthèse bibliographique

2.2.1 Bibliographie scientifique

Les articles scientifiques ont été recherchés sur Google Scholar avec les associations de mots-clés suivants : « crop », « cover crop », « catch crop » ou « double crop » + « biogas » ou « digestate ». Par ailleurs la recherche bibliographique s'est appuyée sur celles réalisées par des doctorants INRAE sur le sujet.

Ayant assez peu de résultats scientifiques concernant la méthanisation avec CIVE, les résultats ont été élargis à la méthanisation de cultures dédiées là où des similitudes peuvent exister (caractéristiques du digestat par exemple) ou bien à la méthanisation en général.

2.2.2 Bibliographie technique

La recherche d'articles techniques s'est faite à la fois sur des sites d'organismes ciblés (Arvalis Institut du Végétal et Terres Inovia pour les conduites de CIVE, Ademe, ATEE, Prométhéa, Solagro pour la méthanisation en général, etc.) et sur Google avec les mots-clés suivants : CIVE, méthanisation agricole.

2.3 Enquête auprès de méthaniseurs agricoles franciliens

Un questionnaire d'enquête a été élaboré et présenté au comité de pilotage de l'étude lors de la première réunion de comité de pilotage le 10 novembre 2020. Un guide d'entretien simplifié a également été élaboré sur la base du questionnaire d'enquête.

La DRIAAF a envoyé un courrier aux agriculteurs méthaniseurs franciliens pour les informer de la tenue de l'étude et de l'organisation de l'enquête. Les rendez-vous avec les agriculteurs méthaniseurs ont été pris suite à un échange téléphonique et un email. Les enquêtes se sont déroulées entre le 16/12/2020 et le 17/02/2021.

La totalité des 11 méthaniseurs agricoles sans élevage d'Ile-de-France ont été enquêtés, au cours de 10 entretiens, dont 9 en physique sur le site du méthaniseur ou dans la ferme d'un agriculteur méthaniseur, et 1 entretien téléphonique.

Au cours de ces entretiens, 22 personnes ont été interviewées. Les personnes interviewées sont toutes des associés d'un des méthaniseurs agricoles sans élevage d'Ile-de-France. Elles ont été interviewées

seules ou en groupe de 2 à 4 personnes. Les associés des méthaniseurs agricoles sans élevage d'Île-de-France représentent au total 41 personnes.

2.4 Prélèvement de digestats pour analyse

Des prélèvements de digestats ont été réalisés sur l'ensemble des 11 unités de méthanisation enquêtées. Ces prélèvements ont été réalisés au niveau du post-digesteur (digestat brut), en sortie de séparation de phase (digestat liquide) et au niveau du stockage extérieur (digestat solide).

Les échantillons ont été congelés dans les quelques heures suivant le prélèvement, puis envoyés au Laboratoire Départemental d'Analyse et de Recherche de l'Aisne (LDAR) pour analyse.

Les analyses réalisées sont des analyses physico-chimiques classiques pour estimer les apports d'éléments nutritifs, des déterminations de l'indice de stabilité de la matière organique (ISMO) pour estimer la contribution des digestats à la matière organique du sol et des incubations en conditions contrôlées pour déterminer la cinétique de minéralisation du carbone et de l'azote organique (notamment pour estimer la contribution de l'azote organique à la fourniture d'azote aux cultures). Les protocoles utilisés sont indiqués dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Méthodes analytiques mises en œuvre sur les digestats

Paramètre	Méthode
Matière sèche	NF U44 171
Carbone organique	NF U 44 160
Kjeldahl N	Méthode interne Kjeldahl
N-NH ₄	Adapté de NF U42-125
P ₂ O ₅ total	Adapté de NF EN ISO 11885
K ₂ O total	Adapté de NF EN ISO 11885
Indice de stabilité de la matière organique (ISMO)	FD U 44-162
Minéralisation du C et du N	Adapté de FD U44-163 et FD U42-163

2.5 Simulation des performances à la parcelle

2.5.1 Outil PROLEG

L'outil PROLEG (Levasseur and Houot, 2019) (Figure 1) développé dans l'UMR ECOSYS a été utilisé pour simuler les performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture avec ou sans méthanisation. Cet outil combine l'intérêt des outils multicritères pour évaluer des systèmes avec un ensemble d'indicateurs et la sensibilité de modèles de recherche pour évaluer finement les effets de changement de systèmes. Il intègre le modèle AMG (Clivot et al., 2019; Levasseur et al., 2020) pour évaluer le stockage de carbone et STICS (Brisson et al., 2008; Florent Levasseur et al., 2021) pour évaluer les fournitures d'azote à la plante et les pertes d'azote du système (NO₃⁻, N₂O, NH₃). En addition d'indicateurs relatifs au stockage de carbone, aux besoins en engrais ou aux pertes d'azote, l'outil intègre également différentes équations bilan et bases de données qui permettent de calculer des bilans gaz à effet de serre à la parcelle, des bilans de la contamination du sol en métaux ou bien encore des indicateurs de fertilité du sol (battance, biomasse microbienne, etc.).

L'outil n'est pas dédié à la prédiction de la production de biomasse. Il fonctionne avec des objectifs de rendement qui sont prédéfinis, mais il est possible de vérifier si ces objectifs sont atteints ou non.

L'outil peut être utilisé selon deux modes de fonctionnement concernant la fertilisation azotée :

- soit la fertilisation minérale et organique est une donnée d'entrée et l'outil prédit les dynamiques de l'azote suivant ces pratiques,

- soit l'outil réalise un bilan d'azote prévisionnel prédisant les besoins en azote minéral et s'en sert pour ajuster les doses d'engrais minéral (avec une fertilisation organique qui reste elle une donnée d'entrée).

Dans cette étude, l'outil a été majoritairement utilisé avec un ajustement des doses d'engrais selon un bilan prévisionnel, l'objectif de l'étude n'étant pas de s'intéresser à un déséquilibre de la fertilisation. Seule une fertilisation fixe des CIVE sera considéré en scénario alternatif (cf. paragraphes 6.1.4.2 et 6.1.5.2).

Le calcul des résultats socio-économiques (marge, temps de travail) à la parcelle n'étant pas l'objet de l'étude, l'outil n'a pas été paramétré de façon adéquate sur ce sujet (prix de vente des productions dont les CIVE et coût d'achat des différents intrants...) et les résultats associés ne seront pas présentés. Ces calculs sont par ailleurs faits à l'échelle de l'exploitation (voir chapitre 7 p.62).

Les aspects de contamination métallique du sol n'ont également pas été traités dans l'étude.

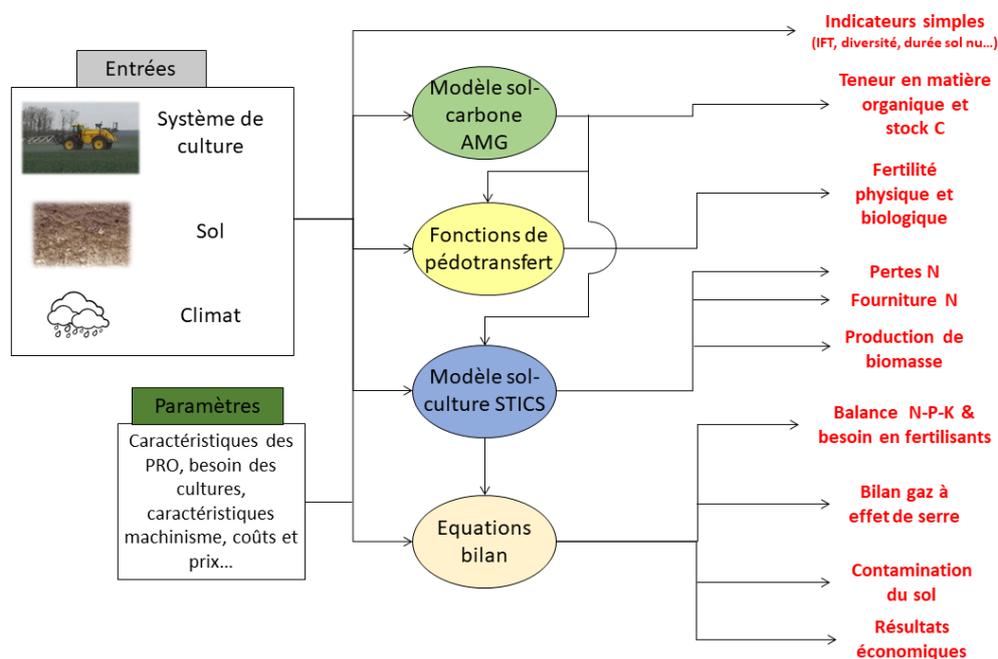


Figure 1 : Principe de l'outil PROLEG

2.5.2 Définition des scénarios à simuler

L'outil PROLEG a été utilisé pour simuler un ensemble de scénarios avec ou sans méthanisation. Un scénario moyen de base avant méthanisation et un scénario de base après méthanisation ont d'abord été définis. Un scénario correspond à une succession de cultures dans un type de sol. Ces scénarios ont été construits pour être représentatifs des situations enquêtées, qui présentaient une variabilité limitée sur les aspects des systèmes de culture modifiés par la méthanisation. Les scénarios décrivent les successions de culture, la conduite des CIVE, la gestion du digestat, l'irrigation, etc. A côté de ces scénarios de base, des variations monofactorielles de certains aspects des systèmes de culture ont été simulées (changement de période d'apport de digestat par exemple), correspondant à une variabilité des pratiques observée sur le terrain ou à des pratiques qu'il semblait intéressant de modéliser. La représentation de cette variabilité vise à étudier comment des changements de pratiques (ou de sol) peuvent influencer les performances des systèmes de culture associés à la méthanisation sans élevage (en termes de stockage de carbone, de pertes azotées, etc.).

2.6 Modélisation du système global

2.6.1 Objectifs spécifiques

L'objectif de la modélisation à l'échelle ferme était dans un premier temps d'évaluer l'effet de la méthanisation sur les bilans environnementaux et nourriciers de systèmes de production agricole complets : émissions de gaz à effet de serre, bilan énergétique, bilan azote, indicateur de potentiel nourricier.

Dans un second temps, il s'agissait de tester des scénarios alternatifs identifiés lors des entretiens et lors de l'étape de modélisation à l'échelle parcelle, afin de déterminer leurs impacts sur le fonctionnement global du système de production, son bilan environnemental et son bilan nourricier, mais également sur ses performances économiques.

L'ensemble des résultats obtenus a permis de nourrir la réflexion sur les recommandations de bonnes pratiques agricoles et les préconisations de recherches complémentaires.

2.6.2 Présentation de l'outil PerfAgroP3

Ce travail s'est basé principalement sur l'utilisation du modèle PerfAgroP3[®], développé par le Céréopa (www.cereopa.fr).

PerfAgroP3[®] est un outil d'aide à la décision en agriculture. Il est fondé sur la mise en œuvre des techniques d'optimisation : il procède de l'application de la technique de calcul par programmation linéaire à un modèle original du fonctionnement de l'exploitation agricole. En programmation linéaire, le programme cherche la valeur extrême d'une combinaison linéaire d'activités possibles soumises à des contraintes qui limitent leurs dimensions et la nature de leurs combinaisons.

L'objectif de PerfagroP3 est d'identifier les caractéristiques de fonctionnement permettant d'optimiser une performance de l'exploitation agricole. Les différentes performances calculées dans l'outil sont : le résultat économique, les émissions de GES, les consommations d'énergie non renouvelable, le potentiel nourricier et les émissions d'ammoniac. Toutes peuvent être utilisées comme « fonction objectif » du modèle de programmation linéaire, faisant de PerfagroP3 un modèle multicritère. Un grand nombre de contraintes, aussi bien internes qu'externes, permettent de définir le champ des possibles, garantissant le réalisme de la solution.

Le modèle actuel permet de représenter tout type d'exploitation agricole comprenant des cultures et/ou des élevages de bovins et/ou porcins. Il contient également un module de méthanisation qui constitue un atelier à part entière, en interaction avec le système de cultures, le système d'élevage et l'environnement de l'exploitation (voir Figure 2).

PerfAgroP3[®] permet donc d'étudier l'intérêt pour une exploitation de construire un méthaniseur et d'en mesurer les impacts sur ses performances et son fonctionnement (changement dans les rotations, effets sur l'alimentation des troupeaux, etc.).

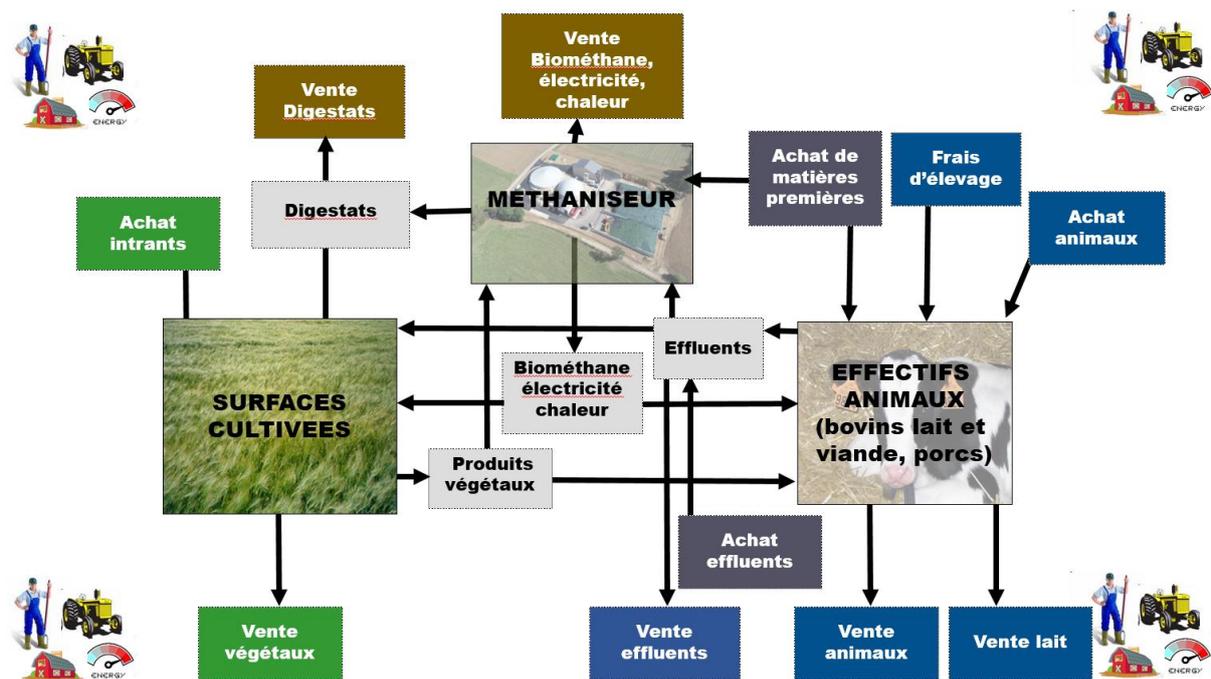


Figure 2 : Représentation schématique du modèle de l'exploitation agricole et du méthaniseur dans PerfAgroP3® (Céréopa)

Dans le cas de la modélisation d'une ferme en grandes cultures, les principaux paramètres en entrée sont les suivants :

- La surface agricole utile (SAU), éventuellement découpée en différentes zones de parcelles agronomiquement homogènes et géographiquement proches, chacune caractérisée par sa propre surface et ses contraintes d'épandage de matière organique et de surface irrigable ;
- Les prix d'achat et de vente, les facteurs d'impact énergie et GES, le potentiel méthanogène et les performances nourricières éventuelles des intrants pour la méthanisation et des matières premières agricoles ;
- Les caractéristiques des fertilisants (teneur NPK des engrais, des effluents et des digestats) ;
- Les paramètres des productions végétales (rendements, charges liées aux itinéraires techniques, coût énergie et GES des itinéraires techniques, besoins des cultures en azote, phosphore et potassium, quantités de matières actives par culture) ;
- Les paramètres du méthaniseur le cas échéant : puissance, débit, temps de fonctionnement, consommation d'électricité/de biogaz etc. ;
- Les bornes inférieures et supérieures des variables décisionnelles (surfaces de chaque culture sur chaque zone, quantités d'intrants et produits achetés ou vendus, production de biogaz, caractéristiques de la ration du méthaniseur tels que % de MS, C/N, etc.).

La démarche de modélisation consiste à définir le jeu de contraintes et à fixer les valeurs des coefficients pour correspondre au mieux à la situation de l'exploitation. L'outil permet ensuite de calculer la combinaison d'activités et de pratiques renseignées ainsi que leur niveau (hectares cultivés, effectifs animaux) qui optimisent le critère de performance choisi.

- Pour les activités végétales : l'assolement sur chaque zone (surfaces en différentes cultures), les stratégies de fertilisation par culture (quantités totales d'engrais minéral et/ou organique), la part des productions vendues ou auto-consommées pour la méthanisation, les surfaces irriguées ;

- Pour la méthanisation : la quantité de biogaz produite et son équivalence en biométhane (pour l'injection) ou en électricité et chaleur (pour la cogénération), la ration du méthaniseur, les quantités de substrats méthanisables achetés.

Une fois la solution optimale calculée, le modèle agrège des indicateurs de performance. Pour le volet économique, l'indicateur est la « marge PerfAgro », qui mesure la différence entre des produits et des charges :

- Du côté des produits, il tient compte des ventes des produits issus des différents ateliers de l'exploitation et des primes éventuelles.
- Du côté des charges, il tient compte des achats d'intrants, des charges de mécanisation, des coûts de main d'œuvre, des charges liées au stockage, à la transformation et à la distribution des intrants (pour la méthanisation), des coûts de fonctionnement du méthaniseur et, dans le cas de cette étude, nous avons inclus l'amortissement du méthaniseur (hors subvention à l'investissement).

Pour le volet social, PerfAgroP3 calcule l'indicateur de potentiel nourricier (quantités de calories et protéines produites pour l'alimentation humaine divisées par les besoins moyens annuels d'un être humain). Enfin, pour le volet environnemental, il calcule le bilan énergétique (à travers un bilan global production-consommation de ressources énergétiques fossiles de l'exploitation), un impact climatique (à travers un calcul d'émissions de GES), les émissions d'ammoniac et l'IFT global.

2.7 Elaboration de préconisations de suivi et de recommandations d'usage

L'objectif opérationnel de cette phase était la production d'un guide de préconisations, de suivi et de recommandation d'usage pour le développement de la méthanisation agricole sans élevage.

Cette étape du travail a consisté en la reprise des résultats des volets précédents de l'étude et en la formulation, sur cette base, soit de préconisations de recherches complémentaires et/ou de recommandations de pratiques agricoles pour le développement de la méthanisation ou l'usage des digestats. Une première liste de préconisations de recherches complémentaires et de recommandations de pratiques a été élaborée et soumise au comité de pilotage (constitué d'acteurs publics et privés de l'ensemble de la filière méthanisation agricole) par oral lors d'une réunion intermédiaire proposée en juillet. Ensuite, les préconisations et recommandations ont été classées selon trois axes thématiques :

- La stratégie d'alimentation du méthaniseur
- La conduite des cultures intermédiaires à vocation énergétique
- La gestion du digestat de méthanisation

Ces trois axes thématiques ont servi à structurer les préconisations et recommandations dans le guide.

Une première version du guide a été produite en septembre et soumise à la DRIAAF. Une version amendée a été soumise par mail au comité de pilotage et aux agriculteurs méthaniseurs enquêtés lors de l'étude, et présentée à l'oral lors de la dernière réunion du comité de pilotage de l'étude, en octobre 2021. Les retours des membres du comité de pilotage et des agriculteurs ont été recueillis jusque début décembre pour écrire la version finale du guide.

3 Synthèse bibliographique

3.1 Impacts agronomiques

3.1.1 Production de biomasse

De nombreuses études ont évalué le potentiel de production de biomasse de différentes espèces cultivées en CIVE (Graß et al., 2013; Negri et al., 2014; Wannasek et al., 2019) : par exemple triticale, seigle, orge, navette en CIVE d'hiver, maïs, sorgho ou tournesol en CIVE d'été. Globalement, la production de biomasse d'un système CIVE + culture alimentaire est supérieure à la production d'une culture alimentaire (ou dédiée) seule (Heggenstaller et al., 2008; Negri et al., 2014), même si le rendement de la culture alimentaire peut-être diminué par l'insertion de CIVE (Graß et al., 2013). Le rendement des CIVE est positivement influencé par la fertilisation (Sieling et al., 2013) et l'irrigation (Schittenhelm, 2010), le maïs d'autant plus que le tournesol ou le sorgho en CIVE été. De ces différentes études, il ressort que les rendements de CIVE sont très variables entre les espèces, les variétés, les contextes pédoclimatiques et les pratiques culturales. La CIVE à plus fort potentiel de biomasse peut varier selon le contexte, ainsi que la stabilité des rendements obtenus. L'extrapolation aux conditions franciliennes est donc difficile.

La documentation technique confirme la variabilité des rendements des CIVE entre espèces, entre années, selon les dates de semis et récolte et selon les zones pédoclimatiques (Marsac et al. 2019, Pisor 2013 & 2015). Les espèces testées sont en CIVE d'hiver : avoine, triticale, seigle, orge, mélanges ; et en CIVE d'été : moha, maïs, tournesol, sorgho, millet. La variabilité des rendements est trouvée encore plus grande en CIVE d'été, avec des modalités non récoltées dans le projet OPTICIVE (Marsac et al. 2019) pour cause de verse liée à des événements climatiques exceptionnels (orages). L'ensemble des CIVE testées répondent positivement à la fertilisation. Dans le même projet, il a été constaté que les CIVE d'hiver peuvent engendrer des pertes de rendement sur les cultures suivantes parce qu'elles retardent l'implantation.

3.1.2 Pouvoir méthanogène des biomasses végétales

Le potentiel méthanogène des CIVE est assez similaire entre espèces (Graß et al., 2013), mais peut être plus élevé pour le maïs en CIVE d'été que pour les céréales en CIVE d'hiver (Negri et al., 2014). La maturité des CIVE influe sur ce potentiel : plus la CIVE est récoltée mature, plus ce potentiel décroît (Negri et al., 2014).

Ces informations sont corroborées par la documentation technique. En effet les mesures de potentiels méthanogènes sur un grand nombre d'échantillons de CIVE dans le cadre de plusieurs projets montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les échantillons avec un potentiel méthanogène mesuré en $\text{nm}^3 \text{CH}_4/\text{tMV}$ (Marsac et al. 2019, Pisor 2015). Cependant, d'après E. Pisor (2015), le potentiel méthanogène en CIVE d'été serait un peu plus faible qu'en CIVE d'hiver. Ces résultats sont très variables selon le rendement en biomasse des CIVE. En revanche, pour ce qui concerne les CIVEs d'hiver, les pouvoirs méthanogènes diminuent avec le développement des plantes et leur lignification (Marsac et al. 2019). Mais la production supplémentaire de matière sèche et la siccité des plantes occasionnent des potentiels de production de méthane nettement supérieurs à l'hectare pour ces mêmes CIVE d'hiver.

3.1.3 Gestion de la fertilisation

Plusieurs auteurs suggèrent que l'efficacité de l'utilisation de l'azote des systèmes avec digestat de couverts est meilleure qu'avec des couverts non méthanisés, du fait qu'on réalloue l'azote du couvert au moment où les cultures en ont besoin et sous une forme plus disponible (minéralisation de l'azote organique des couverts dans le méthaniseur). Ces résultats sont particulièrement vrais dans des systèmes biologiques (Brozyna et al., 2013; Gunnarsson et al., 2011) ou pour la méthanisation

d'effluents d'élevage (Möller and Müller, 2012), moins dans des systèmes conventionnels sans élevage où la gestion de la fertilisation avec du digestat peut être plus difficile qu'avec de l'azote minéral. En effet, l'efficacité fertilisante des digestats de biomasse végétale est généralement supérieure à celles des effluents d'élevage et des engrais verts, mais inférieure à celle à des engrais azotés (Gutser et al., 2005). Elle est assez variable en fonction des sols, des conditions d'apport, de la culture, etc., mais varie grossièrement entre 40 et 60% (coefficient d'équivalence engrais).

Par ailleurs, des objectifs élevés de production de CIVE peuvent amener à des besoins en fertilisation plus élevées, les CIVE étant généralement fertilisées (Berti et al., 2017; Heggenstaller et al., 2008; Igos et al., 2016), tandis que la méthanisation de substrats exogènes peut amener à une diminution de la consommation de fertilisants minéraux des cultures du fait de la valorisation de ressources supplémentaires en nutriments. L'introduction de légumineuses en mélange en CIVE peut diminuer les besoins en engrais azotés (Graß et al., 2013). Le bilan global à l'échelle du système de culture en termes de consommation d'engrais minéraux peut donc être assez variable.

Du côté des publications techniques, OPTICIVE (Marsac et al., 2019) montre que, dans des bonnes conditions d'épandage (pas d'enfouissement mais avant pluie), la fertilisation de CIVE d'été (maïs, sorgho, tournesol) avec du digestat brut ou liquide permet d'obtenir les mêmes rendements qu'avec un engrais minéral, ce qui permet d'envisager le remplacement d'une partie de la fertilisation minérale par le digestat. Methalae (Tignon, 2018), un des rares projets proposant le suivi de trajectoires d'exploitations agricoles avec une unité de méthanisation, montre d'ailleurs que les fermes de l'échantillon étudié qui sont en cultures seules ont baissé l'utilisation de fertilisation minérale et augmenté l'utilisation de la fertilisation organique. L'échantillon ne comportant que quatre fermes, le résultat n'est pas représentatif. D'ailleurs, WWF, dans son rapport de 2020 pointe que la recherche de la production importante de biomasse par les CIVE pourrait conduire à une fertilisation inadaptée. Selon les experts sollicités, le retour d'expérience des agriculteurs montre que la substitution minéral/digestat est progressive, certains pouvant avoir recours à de l'engrais minéral pour « booster » le démarrage des CIVE avant de pouvoir utiliser directement le digestat produit. (WWF, 2020)

3.1.4 Gestion de l'eau

L'intégration de CIVE dans la succession va augmenter le prélèvement d'eau global à l'échelle de la parcelle (Feyereisen et al., 2013). Cette augmentation des consommations en eau pourrait réduire les quantités d'eau drainée, limitant ainsi la recharge des nappes, et induire un déficit hydrique sur la culture d'été (culture principale ou CIVE) (Graß et al., 2013). Ces aspects n'ont *a priori* été que peu étudiés dans la littérature scientifique.

Cependant, dans le cadre du projet OPTICIVE (Marsac et al., 2019), des mesures d'humidité pondérale du sol ont montré l'épuisement total des réserves hydriques du sol à la récolte des CIVE d'été (Moha, maïs, sorgho, tournesol, millet), et une consommation très importante des réserves hydriques (état final proche de la réserve de survie) à la récolte des CIVE d'hiver (avoine, triticale, orge, association), sans différence significative entre espèces. Les pluies du mois de mai pourraient permettre, lorsqu'elles ont bien lieu, de recharger la réserve hydrique du sol pour la culture suivante et de ne pas la pénaliser.

3.1.5 Travail du sol

Les enjeux du travail du sol et des modes d'implantation dans les successions de trois cultures en deux ans sont nombreux : maintien de l'humidité des sols, réduction de l'enherbement, temps disponible et portance des sols. Les observations réalisées sur OPTICIVE (Marsac et al., 2019) montrent qu'il est possible de réduire le travail du sol entre une CIVE d'hiver et la culture suivante (sorgho grain), soit avec du semis direct soit avec un travail sur la ligne de semis sur 10-15 cm avec strip-till. Un léger avantage est observé avec le strip-till, qui semble assurer une meilleure implantation de la culture que

le semis direct. Ces modalités d'implantation permettent de gagner du temps entre les deux cultures avec un semis possible le jour de la récolte.

3.1.6 Protection phytosanitaire

Certaines études considèrent des systèmes de double culture (les deux à vocation énergétique) avec une protection phytosanitaire sur chacune des deux cultures, herbicide notamment (Bacenetti et al., 2014). Cependant, certains auteurs indiquent que la production de CIVE induit une diminution de la pression en adventices à l'échelle du système du fait de cycles de culture plus courts, rendant possible la culture de CIVE avec désherbage mécanique et sans herbicide (Graß et al., 2013). Ces aspects n'ont cependant été que peu étudiés.

La plupart des grains d'adventices ne survivent pas durant la méthanisation mésophile (Westerman et al., 2012), ce qui devrait limiter leur dissémination via l'épandage de digestats.

3.2 Impacts sur la qualité du sol

3.2.1 Carbone organique

Les pertes de carbone dans le méthaniseur sous forme de CO₂ et de CH₄ représentent entre 40% et 75% environ du carbone des substrats végétaux (Bareha et al., 2018). Beaucoup moins de carbone retournera donc au sol via le digestat que si les substrats méthanisés étaient directement retournés au sol. Le carbone résiduel dans le digestat à l'issue de la méthanisation est cependant plus stabilisé que le carbone des matières entrantes méthanisées (Béghin-Tanneau et al., 2019; Chen et al., 2012; Thomsen et al., 2013). Ainsi, à quantité initiale de carbone égale, la quantité de carbone qui contribuera à la matière organique du sol peut être similaire voire supérieure dans le cas d'un épandage de digestat issu de matières végétales par rapport au retour au sol direct des mêmes matières végétales non méthanisées (Szerencsits et al., 2016; Thomsen et al., 2013). Certains auteurs indiquent même un effet positif de la digestion anaérobie sur le stockage de carbone dans les sols du fait d'un « priming effect » moins important avec des substrats méthanisés (Béghin-Tanneau et al., 2019). Le « priming effect » correspond à une augmentation de la minéralisation de la matière organique du sol suite à l'ajout de matière organique fraîche.

A côté des transformations du carbone dans le méthaniseur (production de gaz et stabilisation du carbone résiduel), la méthanisation sans élevage peut *a priori* induire des changements de stockage de carbone dans les sols suite à une modification des entrées totales de carbone, ces entrées étant un des principaux déterminants du stockage (Chenu et al., 2019). Ces entrées peuvent en effet être modifiées pour plusieurs raisons :

- modification de la production de biomasse à la parcelle (différentiel de rendement CIVE / CIPAN, modification du rendement des cultures suivantes, changement de rotation...),
- non correspondance entre les parcelles qui produisent les CIVE et qui reçoivent le digestat (une partie seulement des parcelles productrices de CIVE recevant le digestat par exemple),
- méthanisation de substrats extérieurs à la ferme qui augmentent les quantités de carbone dans le système.

Ces changements de stocks suite à des modifications des systèmes de culture ne sont cependant pas quantifiés dans la littérature scientifique. Plusieurs auteurs suggèrent cependant que ces changements peuvent avoir des effets supérieurs à la méthanisation elle-même sur le stockage du carbone (Möller, 2015; Prays and Franko, 2018).

Quelques éléments quantitatifs cependant se trouvent dans OPTICIVE (Marsac et al., 2019). En effet des mesures des biomasses de chaumes laissés à la parcelle après la récolte de CIVE d'hiver et de biomasse racinaire ont montré qu'une assez grande quantité de matière était restituée au sol (jusqu'à

2 t MS/ha de chaumes et l'équivalent en biomasse racinaire dans les 30 premiers cm du sol). La biomasse aérienne peut être ainsi équivalente à la biomasse moyenne d'une CIPAN enfouie (ceci dépendant toutefois du rendement relatif de la CIPAN et de la CIVE). Avec ces hypothèses, la modélisation avec le modèle AMG² montre que l'exportation de CIVE associée à l'apport de digestat permet un stockage de carbone supérieur par rapport à la pratique de restitution des CIPAN.

3.2.2 Vie du sol

Du fait d'une moindre biodégradabilité des digestats de méthanisation en comparaison aux substrats non méthanisés, un moindre développement de la biomasse microbienne du sol peut être observé (Chen et al., 2012). Cependant, peu de références sur l'influence des digestats sur la vie du sol sont disponibles, notamment pour des digestats de substrats végétaux. En parallèle avec des digestats de méthanisation d'autres substrats (effluents d'élevage), on peut s'attendre à des effets positifs à long terme sur la vie du sol en comparaison avec des systèmes sans fertilisation organique (Burmeister et al., 2014; Möller, 2015). Des effets négatifs à court terme sur les populations de ver de terre pourraient aussi être attendus, possiblement à cause de leur forte teneur en azote ammoniacal (Rollett et al., 2020), notamment lors d'épandage dans de mauvaises conditions (sols saturés en eau...). Les connaissances de l'impact des digestats sur la vie du sol sont globalement jugées insuffisantes (Sadet-Bourgeteau et al., 2020).

3.2.3 Couverture des sols et érosion

Le risque d'érosion en lien avec les systèmes de culture associés à la méthanisation sans élevage a été peu étudié dans la littérature. Szerencsits et al. (2015) annoncent une réduction du risque d'érosion du fait d'une couverture des sols plus longue dans ces systèmes. Ces résultats sont cependant très dépendants du type de système de référence (sol nu, CIPAN et sa gestion...). De plus, au-delà de la couverture de sols, d'autres effets de ces systèmes seraient à considérer (travail du sol, compaction...).

Le projet Methalae (Tignon, 2018) montre que les fermes en cultures seules qui s'engagent dans la méthanisation augmentent un peu la surface des cultures intermédiaires, tandis qu'une partie des CIPAN est remplacée par des CIVE, mais le faible nombre de fermes étudiées (quatre) rend impossible l'extrapolation.

3.2.4 Compaction du sol

Les systèmes de culture avec CIVE peuvent induire un risque de compaction des sols du fait du passage d'attelage plus lourd qu'auparavant, à la fois du fait de l'épandage de digestat (Lantz and Börjesson, 2014) et des chantiers d'ensilage (Duttmann et al., 2014). Le risque de compaction des sols est notamment plus fort sur sols argileux et peut induire des pertes de rendements (Lantz and Börjesson, 2014). Le risque de compaction peut cependant être limité via des systèmes d'épandage sans tonne (quasi équivalent à l'épandage d'engrais minéraux) (Lantz and Börjesson, 2014) ou des systèmes de « controlled traffic farming » pour les chantiers d'ensilage (les machines passent toujours au même endroit) (Duttmann et al., 2014).

3.3 Impacts environnementaux

3.3.1 Lixiviation de nitrates

Plusieurs auteurs indiquent une réduction de la lixiviation de nitrates avec CIVE d'hiver par rapport à un sol nu (Heggenstaller et al., 2008; Igos et al., 2016; Szerencsits et al., 2016), la CIVE d'hiver jouant le rôle d'une culture piège à nitrates (CIPAN).

² SIMEOS-AMG est un outil de simulation de l'évolution des teneurs et stocks en C organique du sol fondé sur le modèle AMG. Le modèle AMG est maintenu et amélioré depuis 2012 dans le cadre du Consortium AMG rassemblant l'INRA, Agro-Transfert RT, Arvalis, le LDAR et avec la collaboration de Terres Inovia depuis 2016.

Peu de références comparent l'efficacité d'une CIVE d'hiver par rapport à une CIPAN. Certains auteurs suggèrent que la CIVE pourrait être plus efficace que la CIPAN (Möller and Stinner, 2009), du fait qu'une partie de l'azote minéralisé suite à la destruction de la CIPAN contribue à la lixiviation, à l'inverse du cas de la CIVE où presque toute la biomasse est exportée. Ces résultats sont obtenus dans le cas de destruction précoce des CIPAN, la différence avec la CIVE s'amenuisant dans le cas d'une destruction tardive de la CIPAN.

OPTICIVE (Marsac et al., 2019) aborde également ce sujet. Dans ce projet, les résultats de mesures de reliquats en entrée et sortie d'hiver montrent dans la grande majorité des cas des reliquats sous CIVE très significativement inférieurs aux reliquats sous un sol nu. Ces mesures confirment et traduisent la capacité des CIVE à valoriser et puiser l'azote du sol. Les mesures de reliquats post-récolte de CIVE d'été ont donné des résultats assez élevés, mais toutefois inférieurs au système de référence.

Dans tous les cas, ces résultats expérimentaux sont obtenus dans le cadre d'une fertilisation raisonnée, l'impact potentiel d'une surfertilisation minérale ou avec le digestat n'étant pas étudié. L'effet des changements de succession de culture potentiellement induits par la méthanisation sans élevage n'ont également pas été étudiés.

3.3.2 Volatilisation ammoniacale

3.3.2.1 Au stockage

Plusieurs études ont considéré les émissions au stockage des digestats de méthanisation. Ces émissions peuvent atteindre 30% de l'azote ammoniacal (Sommer, 1997 cité dans Moller, (2015)). Par rapport aux stockages d'effluents d'élevage bruts, la méthanisation est considérée augmenter la volatilisation du fait d'une croûte moins développée en surface (Baldé et al., 2018; Möller, 2015). La couverture des fosses est un moyen efficace pour réduire ces émissions (Möller, 2015). La volatilisation au stockage de digestat de CIVE ne semble pas avoir fait l'objet d'étude spécifique.

3.3.2.2 Au champ

Peu de références spécifiques au digestat de CIVE existent dans la littérature scientifique concernant son potentiel de volatilisation ammoniacale. Cependant, la volatilisation des digestats en général a été étudiée par de nombreux auteurs (Nicholson et al., 2017; Pacholski et al., 2013; Riva et al., 2016), y compris pour des digestats de culture dédiées qui sont *a priori* proches des digestats de CIVE (Wolf et al., 2014). La volatilisation est très variable mais peut atteindre plus de 50% de l'azote ammoniacal épandu et se déroule principalement dans les premières heures suivant l'épandage. Elle est globalement plus élevée que pour les fertilisants minéraux (ammonitrate et solution azotée) communément utilisés en Île-de-France, mais peut être inférieure à celle de l'urée (Verdi et al., 2019). Comme pour l'ensemble des apports azotés (Sommer et al., 2003), la volatilisation ammoniacale des digestats va fortement dépendre de la quantité d'azote apportée, des propriétés du digestat lui-même (proportion d'azote sous forme ammoniacale, viscosité, pH), des conditions météorologiques (température, vent), du type de sol (pH, CEC) et des techniques d'apport et d'enfouissement (injection, pendillard). L'injection ou l'enfouissement rapide permettent de réduire fortement ces émissions (Riva et al., 2016). La séparation de phase permet d'obtenir un digestat liquide contenant la majorité de l'azote ammoniacal et qui s'infiltrer mieux dans les sols. La volatilisation de la phase liquide peut ainsi être réduite par rapport au digestat brut (Evans et al., 2018).

Les pertes par volatilisation à l'échelle du système de culture (et non de l'apport lui-même) n'ont pas été étudiées dans la littérature, tout du moins dans des conditions similaires aux systèmes étudiés ici. L'effet des modifications des systèmes de culture (à la fois rotation et pratiques de fertilisation) n'est pas considéré.

3.3.3 Emissions de protoxyde d'azote au champ

Comme tout apport azoté (Hénault et al., 2012), l'application de digestat peut conduire à une augmentation des émissions de protoxyde d'azote (N_2O) qui est un gaz à effet de serre avec un fort pouvoir de réchauffement global. Le différentiel entre émissions suite à des apports de digestat et suite à des apports d'engrais minéraux reste à explorer, des résultats contradictoires existant (Buchen-Tschiskale et al., 2020; Schwager et al., 2016; Verdi et al., 2019; Wolf et al., 2014) et les émissions étant très variables selon les types de digestat (Askri et al., 2016). La plupart des études existantes ne concernent par ailleurs pas les digestats de CIVE mais des digestats d'effluents d'élevage ou de biodéchets.

Au-delà des quantités d'azote apportées et du type de digestat, les émissions de N_2O sont contrôlées par le type de sol (texture, pH, teneur en carbone organique, compaction) et le climat (bilan hydrique) (Hénault et al., 2012). Certains de ces aspects pouvant être directement affectés par les systèmes de culture associés à la méthanisation sans élevage (compaction suite aux épandages, pH et teneur en carbone organique...), la détermination des effets de ces systèmes sur les émissions de N_2O n'est donc pas directe. Certains auteurs indiquent une réduction des émissions de N_2O suite à l'exportation de CIVE à l'automne en comparaison à l'enfouissement du couvert du fait de l'export d'azote et de carbone organique facilement biodégradable qui promeuvent ces émissions (Möller and Stinner, 2009). Dans cette même étude, les émissions sont cependant augmentées au printemps suivant suite à l'apport de digestat (en comparaison à une situation sans apport de fertilisant).

Par ailleurs, selon les experts sollicités par WWF (2020), les émissions de N_2O sont susceptibles d'augmenter car les CIVE réduisent le drainage, d'autant plus que les biomasses produites sont élevées. En plus, les émissions peuvent augmenter si la fertilisation est inadaptée.

L'effet à l'échelle du système de culture entier est donc important à considérer et est encore trop peu exploré.

3.3.4 Odeurs

La méthanisation est connue pour réduire les odeurs des effluents d'élevage (Orzi et al., 2018). Cependant, dans le cas de la méthanisation sans élevage, le stockage et l'épandage de digestats peuvent être source d'odeurs qui n'existaient pas auparavant, tout comme le stockage de substrats à méthaniser sur site (ensilage...). L'injection des digestats est un moyen efficace pour réduire les odeurs à l'épandage (Orzi et al., 2018). Aucune étude ne semble s'être concentrée sur les odeurs du digestat de CIVE, ni sur les méthaniseurs eux-mêmes. Par ailleurs, la problématique des odeurs est très dépendante du contexte (vent dominant, voisinage...).

3.3.5 Bilan énergétique

Des données sur le bilan énergétique de systèmes de production agricole avec méthanisation sans élevage n'ont été trouvées que dans la documentation technique. Le projet Methalae (Laboubée, 2018) fait état d'une légère baisse de consommations d'énergie primaire à l'échelle de la ferme, dans des exploitations de grandes cultures avec méthanisation, grâce à la substitution d'engrais par du digestat. Une légère augmentation du poste de consommations de fioul liées à la production de CIVE et à l'épandage du digestat est compensée par l'économie d'engrais. Ces résultats sont obtenus sur seulement quatre fermes en grandes cultures, ils ne sont donc pas extrapolables. Par ailleurs, une ACV de la production d'énergie par méthanisation avec des effluents d'élevage et des co-substrats de cultures énergétiques montre qu'une incorporation importante de cultures énergétiques dans la ration du méthaniseur (jusqu'à 90% de gaz produit grâce aux cultures énergétiques) permet de baisser très significativement (de plus de 50%) l'énergie fossile consommée par quantité d'énergie produite par rapport à un diesel fossile (BioIS, 2011).

3.3.6 Bilan gaz à effet de serre

Le bilan Gaz à Effet de Serre (GES) de la méthanisation avec CIVE va dépendre de nombreux facteurs : production d'énergie (gaz ou cogénération), de son utilisation et de l'énergie à laquelle elle est substituée (nucléaire, gaz fossile...), des intrants utilisés pour la production de CIVE, des émissions au stockage des intrants et du digestat, du stockage de carbone dans les sols, des émissions de N₂O au champ, du transport des intrants, de l'éventuelle perte de production alimentaire et de la prise en compte ou non d'un report de production, etc. La plupart des études concernent la méthanisation d'effluents d'élevage ou de cultures dédiées. Ainsi, il est difficile d'extrapoler les résultats existants dans la littérature. On peut citer l'étude de Styles et al. (2015) qui compare différents systèmes et qui indique un bilan GES favorable pour la méthanisation avec CIVE, contrairement à la méthanisation de cultures dédiées, notamment du fait du besoin de surfaces supplémentaires pour compenser la perte de production alimentaire dans le cas des cultures dédiées. D'autres études confirment que le bilan GES de la méthanisation de cultures dédiées n'est pas obligatoirement favorable quand on considère le report de production (Hamelin et al., 2014), tandis que d'autres encore indiquent un bon bilan GES pour la méthanisation d'effluents d'élevage, même si les émissions de méthane au stockage sont à surveiller (Baral et al., 2018). Enfin, l'introduction de cultures ou d'intercultures de légumineuses dans la ration des méthaniseurs est vue comme un moyen d'améliorer leur bilan GES (Stinner, 2015), du fait des économies d'engrais N permises par la fixation d'azote symbiotique.

Dans la documentation technique, on trouve que certaines exploitations agricoles en grandes cultures avec méthanisation ne montrent pas d'évolution significative de leurs émissions de GES globales (Laboubée, 2018). L'ACV (analyse cycle de vie) de la production d'énergie par méthanisation d'effluents d'élevage en mélange avec des cultures énergétiques montre que les cultures énergétiques peuvent contribuer, dans un contexte de co-substrat peu méthanogène (lisier), à réduire le niveau des émissions de GES du Mégajoule moyen de biométhane produit. Elles l'augmentent dans le cas d'un co-substrat plus méthanogène type fumier, tout en gardant un écart important avec les émissions du gaz naturel. (BioIS, 2011)

3.4 Synthèse et identification des besoins de recherche

Le Tableau 2 présente une synthèse des effets de la méthanisation agricole avec CIVE. Il ressort de cette synthèse bibliographique un ensemble d'effets plutôt favorables, d'autres plutôt défavorables, et enfin des effets assez variables ou peu connus.

Tableau 2 : Synthèse des impacts de la méthanisation sans élevage relevés dans la littérature sur les aspects agronomiques, qualité du sol et environnement.

Type d'impact		Nature de l'impact
Impacts agronomiques	Production de biomasse	Augmentation de la production, même si possible diminution de la production de la culture suivant la CIVE d'hiver
	Gestion de la fertilisation	Fertilisation azotée potentiellement plus délicate par rapport à une fertilisation minérale, mais meilleure efficacité de l'utilisation de l'azote du couvert après sa digestion et son retour sous forme de digestat. Economies d'engrais potentielles en cas de méthanisation de substrats exogènes, mais besoin en fertilisants accrus pour des objectifs de production de CIVE élevés. Intérêt des légumineuses en CIVE pour diminuer les besoins azotés.
	Gestion de l'eau	Possible diminution des ressources en eau disponible pour la culture d'été (CIVE ou culture alimentaire) et réduction possible de la recharge des nappes.
	Travail du sol	Réduction du travail du sol possible (notamment strip-till) et compatible avec les contraintes techniques et temporelles de la culture de CIVE.
	Protection phytosanitaire	Manque de connaissance. Réduction possible de la pression adventice (cycles courts, ensilage), mais certaines CIVEs conduites avec un désherbage chimique.
Qualité du sol	Carbone du sol	Neutre à augmentation du stockage. Connaissance insuffisante à l'échelle du système de culture.
	Vie du sol	Variable. Connaissance insuffisante à l'échelle du système de culture.
	Couverture des sols et érosion	Augmentation de la durée où les sols sont couverts. Connaissance insuffisante à l'échelle du système de culture (pour l'érosion).
	Compaction	Risque de compaction du sol augmenté (épandage et ensilage).
Impacts environnementaux	Lixiviation de nitrates	Réduite par rapport à un sol nu, similaire à inférieure en comparaison à avec une CIPAN. Connaissances insuffisantes à l'échelle du système de culture.
	Volatilisation ammoniacale	Emissions au stockage et à l'épandage de digestat. Augmentation des émissions au champ par rapport à une fertilisation minérale.
	Emissions de N ₂ O	Variable, connaissance insuffisante à l'échelle du système de culture.
	Odeurs	Connaissance insuffisante sur la méthanisation de CIVE, mais augmentation potentielle des nuisances par rapport à un système de grandes cultures sans effluents.
	Bilan énergétique	Potentiellement favorable, connaissance insuffisante à l'échelle du système de production.
	Bilan GES	Favorable si peu de pertes de production alimentaire ou report de production associé non considéré. Intérêt des légumineuses en CIVE pour diminuer les émissions liées aux engrais azotés.

De cette synthèse, ressort également un ensemble de constats et de besoin de connaissances supplémentaires :

- Peu d'études concernent spécifiquement la méthanisation sans élevage, hormis les études concernant la méthanisation de cultures dédiées.
- Très peu d'études ont décrit les changements de systèmes induits chez les agriculteurs suite à la mise en place de la méthanisation sans élevage et ont évalué ces effets (hors épandage du digestat). Des interrogations existent donc sur les changements dans les successions de culture, la gestion de la fertilisation, la protection phytosanitaire, le travail du sol, l'irrigation, etc.
- Très peu voire pas d'essais au champ de longue durée avec épandage de digestat et ou cultures de CIVE permettent de documenter ces effets, la plupart des résultats sont basés sur des extrapolations à long terme et de la modélisation.
- Les impacts de la méthanisation sans élevage sont très dépendants de la situation de référence à laquelle elle est comparée : gestion de l'interculture avant la culture des CIVE (sol nu, CIPAN, couvert d'agriculture de conservation...), gestion de la fertilisation avant l'épandage de digestat (minérale, organique), traitements des coproduits co-méthanisés avant la méthanisation (alimentation animale, incinération...), etc. Aucune étude scientifique dans le contexte des systèmes céréaliers franciliens n'existe.
- Les systèmes de culture avec CIVE ne sont pas stabilisés et plusieurs études techniques font état de besoins de recherches en la matière : recherches sur le meilleur itinéraire technique, manque de références sur certaines espèces (en prenant en compte la diversité génétique offerte sur ces espèces) déjà communément méthanisées ou peu courantes en méthanisation, recherches sur la gestion du désherbage dans des systèmes en travail simplifié.

4 Résultats d'enquêtes

4.1 Profils de fermes

Les agriculteurs associés aux méthaniseurs agricoles sans élevage d'Île-de-France qui ont été interviewés dans le cadre de cette étude ont des profils assez similaires. Ce sont des agriculteurs en grandes cultures, betteraviers, en système conventionnel. 2 agriculteurs sur 21 personnes interviewées se réclament de l'agriculture de conservation des sols, même s'ils travaillent le sol plus ou moins superficiellement pour certaines cultures. Enfin un agriculteur se dit en conventionnel mais indique ne quasiment plus labourer.

Les exploitations associées aux méthaniseurs agricoles sans élevage d'Île-de-France (ou groupements d'exploitations familiales gérées par une ou plusieurs mêmes personnes) sont des structures de tailles variées, allant de 235 ha à 800 ha.

Tous les agriculteurs interrogés cultivent du blé, de la betterave, du maïs, de l'escourgeon. La plupart cultivent aussi du colza. Les autres cultures qui sont présentes uniquement chez quelques agriculteurs (parfois sur des surfaces assez importantes au sein d'une même exploitation) sont : féveroles de printemps, orge de printemps, pois d'hiver, pommes de terre, oignons, oignons bulbille, lin textile, prairie de fauche, pois de conserve, haricots verts, sorgho grain, gel ou jachère.

8 méthaniseurs sur 11 reposent sur des exploitations où il existe un système d'irrigation qui permet d'irriguer une petite partie de la sole jusqu'à quasiment toute la surface exploitée. Dans 7 cas sur 8, cette irrigation est historique et préexiste à l'installation du méthaniseur. Dans 1 cas sur 8, le système d'irrigation existe depuis que l'unité de méthanisation a été installée. Dans ce cas, le système d'irrigation a été pensé comme un outil pour sécuriser l'approvisionnement en CIVE d'été et comme un outil de diversification permettant de produire des légumes à forte valeur ajoutée (pois de conserve, haricots verts).

4.2 Profils des méthaniseurs

Tous les méthaniseurs enquêtés regroupent plusieurs associés. La plupart des associés sont des agriculteurs qui participent pleinement à la méthanisation via (1) la production de CIVE qui alimentent le méthaniseur et (2) l'utilisation des digestats produits par le méthaniseur comme fertilisants/amendements sur leurs parcelles. Seulement 2 méthaniseurs sur 11 impliquent des associés non agriculteurs : un méthaniseur a un associé agriculteur et 2 associés hors agriculture, un autre méthaniseur a 2 associés agriculteurs qui fournissent des intrants et utilisent les digestats, et 2 autres associés agriculteurs qui ne participent pas du tout à la méthanisation. Dans ces 2 cas de méthaniseurs, les associés qui ne participent pas à la méthanisation (qu'ils soient agriculteurs ou non) apportent du capital et de l'expertise sur la méthanisation.

Pour les 9 méthaniseurs dont tous les associés participent pleinement à la méthanisation, tous les associés ont un statut d'agriculteur sauf un associé qui est une sucrerie, elle-même propriétaire d'une ferme qui participe pleinement à la méthanisation.

Les méthaniseurs enquêtés ont été mis en fonctionnement entre 2014 et 2020. Aux extrêmes on a d'un côté 2 méthaniseurs avec une ancienneté de 1 an (installation 2020, pas encore de digestat épandu au moment de l'interview), et de l'autre 2 méthaniseurs qui ont une ancienneté de 7 ans (installation 2014). Entre les deux on a 1 méthaniseur de 2 et de 3 ans, 4 méthaniseurs de 4 ans et un méthaniseur de 5 ans. Ainsi globalement les méthaniseurs agricoles sans élevage d'Île-de-France sont jeunes, et la plupart des personnes interviewées en ont une expérience encore très fraîche.

La quantité de biogaz produite n'a pas été relevée pour tous les méthaniseurs car elle n'est pas indispensable à la compréhension des systèmes de culture et de production agricole. Pour 8 méthaniseurs sur 11, elle s'étale de 140 Nm³ à 300 Nm³/h. Pour les 11 méthaniseurs enquêtés, la quantité de substrats traités va de 10 000 t à 27 000 tonnes annuelles, pour une production de digestat correspondante allant de 10 000 m³ à 27 000 m³ environ. Le temps de séjour du substrat dans le méthaniseur a été relevé pour 4 des méthaniseurs enquêtés : supérieur à 120 jours, allant jusqu'à 160 jours.

La surface consacrée à la production de CIVE pour alimenter le méthaniseur est très variable selon les méthaniseurs. Elle s'étale de 55 ha pour un des méthaniseurs jusqu'à 400-450 ha pour 3 méthaniseurs. Elle est, dans tous les cas, variable suivant les années en fonction des stocks restants et des ressources extérieures disponibles, la surface indiquée par la ou les personnes interviewées étant une surface moyenne (parfois une fourchette). La contribution des CIVE à l'alimentation des méthaniseurs est également variable selon les années. En moyenne, elle va de 16% de la ration à un peu plus de 70% de la ration (Tableau 3). Une majorité de méthaniseurs sont alimentés avec une ration basée sur 50% à 60% de CIVE. Tous les méthaniseurs utilisent des pulpes de betteraves ou des déchets de sucreries (radicelles). La plupart des méthaniseurs utilisent des issues de céréales. Les autres matières premières intégrées à la ration sont assez diverses et dépendent des opportunités locales.

Tableau 3 Types de digestat et ration correspondante pour les méthaniseurs agricoles enquêtés

Méthaniseur	Digestat	Ration du méthaniseur
1	Brut	1/3 CIVE, 1/3 biodéchets, 1/3 déchets industries agro-alimentaires (dont pulpes de betteraves)
2	Brut	50% CIVE, 27% pulpes de betteraves, 9% issues de céréales, autres
3	Brut	60% CIVE, 33% biodéchets, 7% pulpes de betteraves
4	Brut	60% CIVE, 16% pulpes de betteraves, 10% issues de céréales, déchets industries agro-alimentaires
5	Brut	50% CIVE, 25% pulpes de betteraves, 15% issues de céréales, 10% déchets industries agro-alimentaires
6	Brut	2/3 CIVE, 1/3 pulpes de betteraves
7	Liquide + solide	50% CIVE, 30% pulpes de betteraves, 5% issues de céréales, déchets industries agro-alimentaires
8	Brut	70% CIVE, 20% déchets sucrerie, 10% issues de céréales
9 et 10 (même propriétaire)	Brut	50% CIVE, 30% pulpes de betteraves, 20% autres matières premières agricoles (oignons, pulpes de pommes de terre, menues pailles, etc.)
11	Liquide + solide	16% CIVE, 30% issues de céréales, 11% issues de tri de carottes, 20% issues de tri de pommes de terre, 24% pulpes de betteraves

Pour 3 méthaniseurs la capacité de stockage de digestat est de 6 mois environ. Les associés d'un de ces méthaniseurs ont le projet d'augmenter cette capacité de stockage. Pour 3 autres méthaniseurs la capacité de stockage est de plus d'un an. Pour 3 autres, elle est légèrement inférieure à 1 an. Enfin pour un dernier méthaniseur, la capacité de stockage n'a pas été relevée.

Pour 9 méthaniseurs sur 11, le digestat ne subit pas de séparation de phase et est épandu brut. Pour plusieurs agriculteurs, la raison invoquée est que le parcellaire est très regroupé et ne nécessite pas de gestion différenciée. Pour 2 d'entre eux, les associés réfléchissent à la séparation de phase, justement pour pouvoir gérer les phases de façon différenciée en fonction de l'éloignement et des caractéristiques des parcelles. Pour les 2 derniers méthaniseurs, il y a séparation de phase et une gestion différenciée des phases liquide et solide.

4.3 Principaux changements dans les systèmes de production liés à la mise en place de la méthanisation

4.3.1 Changements dans l'assolement : cultures principales

Chez tous les agriculteurs interviewés il y a eu soit une réintroduction du maïs et de l'escourgeon ou une augmentation de la surface en maïs et en escourgeon. Ces deux cultures permettent en effet l'introduction de CIVE, soit des CIVE d'hiver avant maïs dont le semis est tardif, soit des CIVE d'été après escourgeon dont la récolte est précoce.

Ceci s'est accompagné dans tous les cas d'une baisse de la sole en blé, parfois d'une baisse de la sole en betterave et/ou de la sole en colza, voire de la disparition du colza dans 3 fermes. Pour la betterave et le colza, ces dynamiques ne s'expliquent pas que par la méthanisation mais aussi par un contexte économique et/ou de pressions de ravageurs (insectes) défavorable. Chez les agriculteurs où le colza diminue mais ne disparaît pas, il reste souvent dans les petites terres, où on ne fait pas de CIVE.

Chez 2 agriculteurs on voit aussi apparaître le pois d'hiver dans les rotations, le pois d'hiver étant un bon précédent de CIVE d'été.

Chez un agriculteur, la mise en place de la méthanisation est liée à une réflexion globale sur la diversification, qui s'accompagne de l'investissement dans un système d'irrigation et l'introduction de légumes dans l'assolement (pois de conserve, haricots verts). Ces légumes sont par ailleurs de très bons précédents ou suivants de CIVE et sont donc très compatibles avec la méthanisation.

L'assolement moyen avant méthanisation et après méthanisation des agriculteurs enquêtés est présenté en Figure 5 p.37.

4.3.2 Les types de CIVE

L'importance des CIVE dans les assolements est assez variable entre les différents exploitants enquêtés, variant entre 20% et 75% de la SAU environ, avec une moyenne à 35%. Parmi ces 35%, la part de CIVE d'été est majoritaire (25% en moyenne, variant de 10 à 35% environ), notamment à la suite de l'orge d'hiver grain cultivée en remplacement du blé. La part de CIVE d'hiver varie entre 0 et 35% (moyenne de 10%), avant maïs grain principalement.

Dans la plupart des exploitations, les CIVE d'hiver viennent remplacer des CIPAN (Culture Intermédiaire Piège à Nitrates) ou des SIE (Surfaces d'intérêt écologique) auxquelles les agriculteurs avaient recours avant la méthanisation. Cependant, dans une des exploitations enquêtées, les CIVE ont permis l'introduction de couverts dans la rotation. En effet, avant la méthanisation, en l'absence de possibilités de valorisation économique, l'agriculteur avait recours à toutes les dérogations possibles pour ne pas cultiver de CIPAN, pour des raisons techniques et économiques (parce que la CIPAN n'avait pas de rentabilité et était trop contraignante sur le plan technique et organisationnel).

Tous les agriculteurs interviewés font du maïs en CIVE d'été, semé fin juin/début juillet. 2 méthaniseurs sont approvisionnés uniquement avec des CIVE d'été, à savoir du maïs, et pas avec des CIVE d'hiver. 5 méthaniseurs sont approvisionnés en escourgeon CIVE d'hiver, 2 autres en seigle CIVE d'hiver. Les autres méthaniseurs ne sont pas fournis en seigle car il apporterait trop de viscosité à la ration.

Quelques agriculteurs explorent des pistes : mélanges de graminées ou méteils en hiver, orge de printemps semé en novembre en hiver, mélanges d'avoine et tournesol, ou tournesol seul en été, sorgho en été. En termes de culture principale derrière une CIVE d'hiver, les agriculteurs font très majoritairement du maïs grain, certains font du sorgho grain. Un agriculteur a la possibilité de faire des haricots verts parce qu'il a des contrats avec un industriel. En termes de culture principale avant une CIVE d'été, on a principalement de l'escourgeon récolté en grain. Chez quelques agriculteurs on a aussi du pois d'hiver, considéré comme un très bon précédent. Un agriculteur a également pu faire du maïs CIVE après un blé une année très précoce. Chez les agriculteurs légumiers, en fonction des contrats, le pois de conserve est aussi utilisé comme précédent de la CIVE d'été.

4.3.3 La production de CIVE d'hiver

En termes d'itinéraires techniques, l'orge d'hiver (ou escourgeon) CIVE est conduite dans la grande majorité des cas d'une façon très similaire à l'escourgeon grain. En termes de désherbage, pour 3 méthaniseurs le désherbage est identique à un escourgeon grain (désherbage d'automne et de printemps). Pour 4 méthaniseurs, seul le désherbage d'automne est nécessaire. Pour un des méthaniseurs, les mauvaises herbes sont gérées grâce à l'ensilage. En termes de protection fongicide, on a globalement moins de traitements qu'un escourgeon classique. Pour la plupart des agriculteurs, un seul passage de fongicide est suffisant, à une dose plus faible que pour un escourgeon grain (2/3 à 3/4 de la dose apportée à l'escourgeon grain). Pour un agriculteur, le fongicide n'est pas nécessaire. En termes d'insecticide, 1 ou 2 sont utilisés à l'automne. Un seul agriculteur (avec une expérience encore récente de la méthanisation) a parlé d'une conduite de CIVE d'hiver (seigle) sans produits phytosanitaires. Mais pour l'orge (dans son cas une orge de printemps semée à l'automne), il a souligné la problématique insectes (pucerons) qu'il n'arrive pas à résoudre. Enfin pour la fertilisation, une quantité d'azote soit identique soit légèrement inférieure (environ 20 unités d'azote en moins) à celle de l'escourgeon grain est apportée. Sont invoqués les manques de références disponibles pour calculer la dose totale d'engrais nécessaire pour un objectif de rendement de l'escourgeon en ensilage. Le calcul de la dose à apporter est donc fait en partant de l'objectif de rendement en grain, légèrement réduit compte tenu de la date de récolte. L'azote est apporté sous forme minérale et organique, avec dans la très grande majorité des cas un premier apport en minéral en sortie d'hiver, et le second apport en digestat, à une dose de 40 m³/ha en moyenne.

Pour les mélanges cultivés en CIVE d'hiver pratiqués par un seul agriculteur pour le moment, un désherbage d'automne seulement est mentionné. En termes de fertilisation sont pratiqués 2 passages de digestat : une fois à l'été/automne (25 m³/ha), une fois au printemps (25 m³/ha), et a priori pas de passage de minéral. Pour le seigle, un agriculteur évoque une protection fongicide et insecticide divisée par 2 par rapport à des céréales d'hiver classiques. Un autre agriculteur avance qu'aucune protection phytosanitaire n'est nécessaire pour le seigle, lié à une moindre sensibilité aux insectes qui permet, contrairement à l'orge, de s'affranchir d'insecticide. En revanche le seigle aurait tendance à assécher davantage le sol, privant davantage que l'orge la culture suivante en eau.

Il n'y a jamais d'irrigation des CIVE d'hiver chez les agriculteurs interviewés.

Les rendements enquêtés d'orge d'hiver CIVE sont assez peu variables entre les enquêtés avec une moyenne à 10 t MS/ha (et un écart-type de 1 t MS/ha). L'ensilage de l'orge CIVE est réalisé à la mi-mai, ce qui retarde le semis du maïs grain suivant chez la totalité des enquêtés et entraîne une perte de rendement du maïs grain estimée environ à 20% par les enquêtés.

4.3.4 La production de CIVE d'été

Une grande majorité des agriculteurs travaille le sol avec un outil strip-till (travail sur la ligne de semis seulement) avant l'implantation du maïs. L'intérêt est de préparer le sol sur la ligne de semis

seulement, tout en gardant de l'humidité dans le sol. Un agriculteur réalise un travail superficiel au chisel et un passage au rouleau avant de semer, ce qui lui permettrait de mieux gérer les adventices. 4 autres agriculteurs adoptent les 2 stratégies : passage de digestat puis déchaumage un peu creux puis semis direct, ou strip-till. Le semis se fait avec un écartement de 50 à 60 cm (donc espacement plus réduit qu'un semis de maïs classique) pour maximiser la couverture du sol. La plupart des agriculteurs font état de difficultés à gérer les repousses d'orge dans le maïs et invoquent la nécessité certaines années de recourir à 1 voire 2 désherbages (antigraminées mais aussi antidicotylédones). Certains parlent d'un seul désherbage à dose réduite (antigraminées). 2 agriculteurs arrivent pour le moment à gérer la pression adventice, soit avec le strip-till soit avec un travail superficiel. La pression adventice est moindre pour un maïs CIVE derrière un pois d'hiver ou un pois de conserve. Dans ce cas l'herbicide est rarement nécessaire. Parfois un antidicotylédones est utile.

Un antipyrrole est utile chez un petit nombre d'agriculteurs. Chez la plupart il n'y a pas de pression insectes sur les maïs CIVE justifiant une quelconque intervention.

En matière de fertilisation, la plupart des agriculteurs apporte un engrais minéral avec le strip-till s'ils sont équipés, ou juste avant le strip-till (solution azotée). Puis ils apportent un engrais starter avec le semis (apport localisé de DAP). Dans un cas, l'engrais starter est mis avec le strip-till et c'est de l'ammonitrate 33 qui est apporté après semis. Pour arriver à ne pas apporter d'engrais minéral sur la CIVE d'été, quelques agriculteurs évoquent la possibilité d'apporter le digestat juste avant le semis puis d'enfouir avec un déchaumeur. Cependant cette solution pose des problèmes logistiques et de temps importants à la grande majorité des agriculteurs interrogés, à une période où il faut aller très vite pour que la CIVE soit en terre au plus tôt. C'est pourquoi quelques agriculteurs indiquent avoir essayé de surdoser le digestat sur la culture précédente par rapport aux besoins estimés, pour soit complètement s'affranchir d'azote minéral sur le maïs CIVE, soit diviser la quantité d'azote minéral apportée sur maïs CIVE par 2 environ. Le manque d'expérience sur ce type de pratique n'a pas permis à l'agriculteur qui a évoqué ce chiffre d'être plus précis. En termes de quantités d'azote, la stratégie très majoritaire est d'apporter 20 à 40 unités d'azote en moins que le maïs grain classique (même problème que la CIVE d'hiver de manque de référence pour le calcul de la dose à apporter). Un seul agriculteur apporte seulement 60 unités d'azote sur son maïs CIVE. Chez lui l'aléa climatique en été, et donc l'aléa en rendements de CIVE d'été est tel, qu'il choisit de ne pas trop investir dans les CIVE d'été. L'ensemble des agriculteurs évoquent la difficulté à piloter l'azote correctement pour les CIVE d'hiver comme d'été, compte tenu de l'absence de nombreuses références indispensables pour le faire, notamment les besoins en azote des CIVE.

Les agriculteurs qui ont du matériel d'irrigation irriguent pour la plupart leurs CIVE d'été. Pour autant ces cultures ne sont pas prioritaires : sont irriguées d'abord les cultures à forte valeur ajoutée ou les cultures sous contrat. Pour 2 de ces agriculteurs en revanche l'irrigation est strictement réservée à d'autres cultures (pommes de terre) car leur quota d'eau est limitant.

Les rendements annoncés en maïs CIVE d'été sont très variables selon les années climatiques, avec en revanche peu de variabilité entre fermes enquêtées. Le rendement moyen annoncé est de 6 t MS/ha pour presque toutes les exploitations, avec une variabilité interannuelle de 0 à 12 t MS/ha.

4.3.5 La production de cultures dédiées

3 agriculteurs enquêtés ont évoqué la possibilité de produire des cultures dédiées, dans la limite réglementaire des 15% du tonnage brut de la ration. La production de cultures dédiées est plutôt une production d'opportunité, dictée par les besoins en substrat pour le méthaniseur ou par des problématiques agronomiques. Il peut s'agir de maïs derrière une CIVE d'hiver que l'agriculteur conduit d'abord pour être récolté en grain, puis décide finalement de le récolter en ensilage pour ajuster les

stocks de CIVE. Il peut aussi s'agir d'escourgeon conduit d'abord pour être récolté en grain, puis face à des problèmes de pressions d'adventices et pour ne pas avoir à faire de rattrapage d'herbicides au printemps, l'agriculteur décide de gérer par l'ensilage. Chez un des agriculteurs, une petite partie des surfaces cultivées a été remise en herbe, fauchée et ensilée pour être méthanisée.

4.3.6 L'épandage des digestats

Tous les digestats bruts ou liquides sont épandus principalement avec un système d'épandage sans tonne et avec un pendillard, à une dose de 40m³/ha en moyenne (fourchette entre 25 et 50). Pour le digestat brut ou liquide, en l'absence de références locales, les agriculteurs considèrent qu'entre 50 et 60% de l'azote est disponible dans leur calcul de bilan. Les digestats solides sont épandus avec un épandeur à fumier, à une dose de 10 t/ha. 5 méthaniseurs peuvent distribuer le digestat brut ou liquide grâce à des réseaux d'irrigation enterrés. Pour les autres méthaniseurs, et pour épandre sur les parcelles non accessibles avec les réseaux d'irrigation, les agriculteurs utilisent soit des lagunes déportées, soit des caissons déportés approvisionnés par camions, avec de l'épandage sans tonne, ou bien de l'épandage à la tonne à lisier (une seule ferme pour une très faible surface).

L'épandage du digestat liquide ou brut est réalisé très majoritairement sur céréales (grain ou CIVE) en sortie d'hiver (fin janvier à début mars), en premier ou deuxième apport d'azote. Il peut aussi être épandu à l'été/automne soit au semis soit dans les CIPAN. De façon très anecdotique il peut être épandu juste avant le maïs CIVE avec un enfouissement au déchaumeur, mais la plupart des agriculteurs invoquent la difficulté logistique. En effet à cette période il faut se dépêcher de semer et perdre le minimum de fraîcheur et d'humidité du sol. Dans ce contexte il est difficile de caser un chantier d'épandage. Un agriculteur évoque la possibilité d'apporter le digestat sur le maïs CIVE en inter-rang avec une bineuse.

La plupart des agriculteurs ont une capacité de stockage de digestat brut ou liquide importante (de l'ordre de 1 an), ou projettent d'en avoir une. Il s'agit alors d'avoir une capacité de stockage suffisante pour avoir la possibilité d'épandre au maximum sur céréales en sortie d'hiver, période considérée comme étant celle qui permet de valoriser au mieux le digestat et qui n'est pas trop contrainte sur le plan logistique. Les agriculteurs qui ont moins de capacité de stockage doivent répartir les épandages sur plusieurs périodes, notamment l'été.

La part moyenne de SAU épandue chaque année est estimée varier entre 25 et 75%, avec une moyenne à 60% environ sur l'ensemble des exploitations enquêtées.

4.3.7 Autre fertilisation organique

Au moins trois enquêtés ont déclaré utiliser des amendements ou fertilisants organiques avant la méthanisation (compost de déchets verts et d'effluents d'élevage, boues de STEP, effluents d'élevage séchés en bouchon) mais avoir arrêté depuis qu'ils épandent du digestat, s'estimant autosuffisant en fertilisant/amendement organique. Un autre prévoit d'arrêter d'utiliser du compost de déchets verts une fois qu'il aura du digestat à épandre (pas encore d'épandage réalisé) pour la même raison. Enfin, une autre ferme s'est mise à épandre du compost et une autre a maintenu ses épandages de vinasse après la méthanisation, sans lien avec la méthanisation dans les deux cas.

4.4 *Autres impacts et enjeux soulevés*

Les enquêtes ont été l'occasion de relever certains impacts attendus et enjeux soulevés par la méthanisation agricole mis en avant par les agriculteurs interviewés :

- Enjeu économique : recherche de stabilité ou de maîtrise du revenu par la diversification des sources de revenu, affranchissement de la variabilité des cours des matières premières agricoles, attraction pour la stabilité des contrats long terme ;

- Enjeu social : renouveler l'intérêt du métier par la diversification de l'activité, développement relationnel, ouverture à d'autres thématiques et enjeux ;
- Enjeu agronomique : apporter de la matière organique au sol, diminuer la dépendance vis-à-vis des engrais minéraux ;
- Enjeu emploi : créer ou pérenniser des emplois sur la ferme ou sur le méthaniseur, dans les territoires, valorisation des personnels lors de périodes qui étaient auparavant creuses, redynamiser l'entreprise, maintenir l'entreprise dans sa dimension de ferme familiale ;
- Enjeu environnemental : fierté de produire de l'énergie et de répondre à des enjeux environnementaux stratégiques, contribuer à boucler les cycles C et N.

4.5 Conclusion du travail d'enquêtes

Cette étape d'enquête nous aura permis d'enquêter 100% des méthaniseurs agricoles sans élevage d'Île-de-France en fonctionnement, et d'interviewer un peu plus de la moitié des personnes associées à ces méthaniseurs. L'accueil par les agriculteurs a été très bon et un climat de confiance s'est instauré dans la plupart des cas, ce qui confère une bonne fiabilité aux réponses obtenues. Toutefois un certain nombre de pratiques aura pu échapper à cette analyse du fait que plusieurs agriculteurs participant à la méthanisation n'ont pas été interviewés.

On note globalement une grande homogénéité des systèmes de culture avec CIVE des agriculteurs interviewés. Certaines pratiques se détachent cependant. Une liste non exhaustive est proposée ci-dessous :

- Les systèmes de culture où l'irrigation des CIVE d'été est pratiquée versus les systèmes de culture où l'irrigation n'est pas possible / pas pratiquée
- La production de CIVE d'hiver et d'été sans protection phytosanitaire ou à bas coût (opportunistes) versus les CIVE d'hiver et d'été conduites de façon plus intensive
- Les systèmes avec CIVE d'été seule versus les systèmes avec CIVE d'été et CIVE d'hiver
- Les CIVE moins classiques : le pois d'hiver, le seigle, le sorgho
- Différentes stratégies d'apport de digestat (automne, sortie d'hiver, surdosage, été) et avec différents matériels (pendillard, épandeur à fumier avec enfouissement, etc.)

Une partie de ces pratiques a été explorée dans la phase de modélisation pour les évaluer.

5 Caractérisation des digestats

5.1 Analyses physico-chimiques

La composition physico-chimique des digestats analysés est représentée en Figure 3 (valeurs numériques en Annexe p.81). Les digestats bruts et liquides sont très similaires entre eux, et similaires à un lisier porcin : faible teneur en matière sèche et en carbone organique, faible teneur en azote (relativement à un engrais minéral), mais azote principalement sous forme minérale (ammoniacale). Ils sont cependant globalement moins riches en phosphore mais plus riche en potassium qu'un lisier porcin. En comparaison, le digestat solide se rapproche plus d'un fumier bovin avec de plus fortes teneurs en matière sèche et en carbone organique par rapport aux digestats bruts. Les teneurs en azote total sont du même ordre que pour les digestats bruts, mais cet azote est principalement organique. Les digestats solides sont par ailleurs assez concentrés en phosphore par rapport au fumier et autres digestats, mais moins concentrés en potassium que les fumiers. Les différences entre digestats sont cohérentes avec l'effet de la séparation de phase qui concentre matière particulaire, carbone et phosphore dans la phase solide, mais laisse l'azote ammoniacal et le potassium solubles dans la phase liquide (Guilayn et al., 2019). L'influence des co-substrats ne semble pas expliquer la variabilité des compositions chimiques observées. Enfin malgré la relative homogénéité des digestats analysés, il convient tout de même de souligner la variabilité de certains paramètres, comme l'azote total qui peut varier de 0.36% à 0.63% de la masse fraîche.

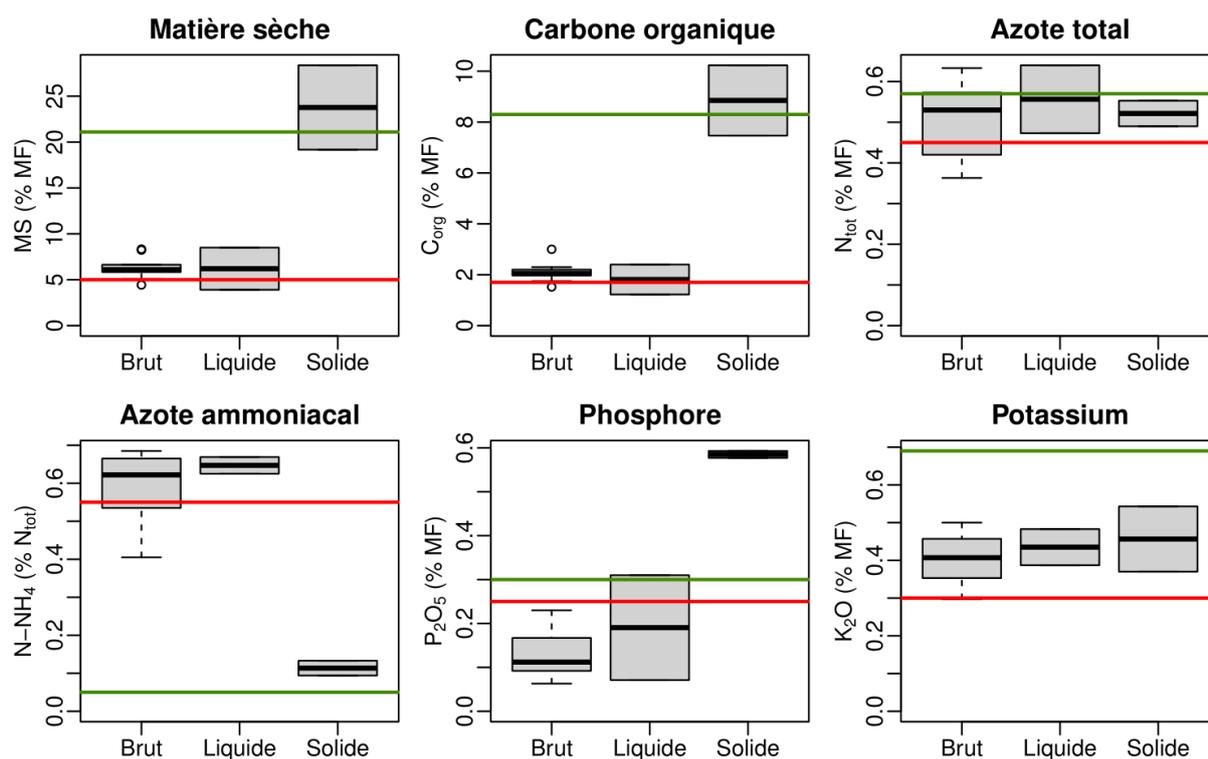


Figure 3 : Composition physico-chimique des digestats bruts (n=9), liquide (n=2) et solide (n=2), en comparaison à un lisier porcin (ligne rouge) et un fumier bovin (ligne verte). MF = matière fraîche.

5.2 Indice de stabilité de la matière organique

Le fractionnement biochimique (Van Soest and Wine, 1967) indique une prépondérance des composés organiques solubles dans les digestats bruts et liquides, tandis que la composition du digestat solide est plus équilibré. La minéralisation à 3 jours des digestats bruts et liquides est plus importante que celle des solides. Il en résulte des indices de stabilité de la matière organique (Lashermes et al., 2009) croissant du digestat liquide, au brut puis au solide.

Cet indice de stabilité est une estimation de la part de matière organique résiduelle du digestat au bout d'un an au champ, part qui contribuera à l'entretien de la matière organique du sol. Cet indice pour les digestats étudiés se situe dans la même gamme que pour des fumiers ou lisiers (Levvasseur et al., 2020). A dose de carbone identique, la contribution des digestats à la matière organique du sol sera donc similaire.

En combinant, teneur en carbone, ISMO et dose d'apport usuelle, on peut estimer un apport de carbone « humifié », c'est-à-dire qui contribue à la matière organique du sol (Tableau 4). Ces apports avec digestat brut et liquide sont faibles, du même ordre que pour des apports de lisier porcin. Ils sont cependant non négligeables, de l'ordre de la moitié du carbone humifié apporté par des pailles de blé. Cet apport de carbone humifié est plus élevé avec le digestat solide malgré une dose plus faible, même s'il reste bien inférieur à celui d'un fumier bovin du fait de cette faible dose (10 t/ha versus 30 t/ha classiquement pour un fumier).

Tableau 4 : Moyenne (et écart-type) du fractionnement biochimique, de la minéralisation à 3 jours et de l'indice de stabilité de la matière organique (ISMO) des digestats étudiés

Paramètres	Digestat brut (n=9)	Digestat liquide (n=2)	Digestat solide (n=2)	Lisier porcin	Fumier bovin	Paille de blé (pour un rendement grain de 100 qx/ha)
Composés organiques solubles (% MO)	54.1	52.6	32.4			
Hémicelluloses (% MO)	15.8	10.6	25.9			
Cellulose (% MO)	13.1	25.2	20.8			
Lignines et cutines (% MO)	17.1	11.6	21.0			
Minéralisation à 3 jours (% C)	14.5	15.6	4.3			
ISMO (% MO)	47.5	38.1	61.4	55*	64*	23
Carbone organique (% MB)	2.1	1.8	8.9	1.7	8.3	44
Dose usuelle (t/ha)	40	40	10	30	30	8.8
Apport de carbone humifié (t C/ha)	0.39	0.27	0.55	0.28	1.59	0.85

* Levvasseur et al. (2020)

5.3 Cinétique de minéralisation

Les cinétiques de minéralisation du carbone donnent une information normalement plus fiable et plus complète (dynamique) que l'ISMO sur la contribution des produits résiduels organiques à la matière organique du sol. Les incubations de laboratoire indiquent un carbone modérément stable avec une minéralisation moyenne à 91 jours de 383 mg C g⁻¹ C ajouté pour les digestats bruts avec une variabilité limitée (écart-type de 92 mg C g⁻¹ C ajouté). Parmi les digestats bruts, la minéralisation du C est la plus élevée pour les digestats issus de méthaniseurs avec une forte proportion de déchets alimentaires co-méthanisés (méthaniseurs 1 et 3, Tableau 3, 544 and 479 mg C g⁻¹ C ajouté, respectivement). Ces valeurs de minéralisation sont globalement supérieures à celles des digestats dans leur ensemble, des composts ou des fumiers (F. Levvasseur et al., 2021), indiquant une moindre contribution à la matière organique du sol des digestats de CIVE par rapport à ces autres matières organiques à quantité de carbone apportée identique. Cette minéralisation est par contre similaire à celle d'un lisier bovin. La minéralisation des digestats liquides est similaire (389 mg C g⁻¹ C ajouté en moyenne) à celle des digestats bruts, tandis que celle des digestats solides est plus faible (173 mg C g⁻¹ C ajouté), indiquant une plus forte contribution à la matière organique du sol que les digestats bruts à dose de C identique.

De façon intéressante, la minéralisation du carbone lors de ces incubations est très corrélée à l'ISMO (R²=0,66 pour tous les digestats ensemble, R²=0,87 pour les digestats bruts), avec une faible différence

entre carbone résiduel à la fin des incubations et l'ISMO (RMSE de 16%). L'usage de l'ISMO (moins coûteux et plus rapide à obtenir que les cinétiques de minéralisation) est donc possible pour étudier la contribution à la matière organique du sol de ces digestats, bien qu'aucun digestat n'ait été utilisé historiquement pour le développement de l'indicateur ISMO (Lashermes et al., 2009).

La minéralisation de l'azote organique à 91 jours est modérée pour les digestats bruts ($85 \text{ mg N g}^{-1} \text{ N}_{\text{org}}$ ajouté) avec une relativement grande variabilité (écart-type égal à $100 \text{ mg N g}^{-1} \text{ N}_{\text{org}}$ ajouté), sans qu'un effet de la ration du méthaniseur ne puisse être mis en évidence. Cependant, une corrélation négative existe entre minéralisation de l'azote organique et teneur en azote total pour les digestats bruts : plus la teneur en azote total est élevée, plus la minéralisation de l'azote organique est faible ($R^2=0.67$). La minéralisation de l'azote organique à 91 jours est un peu supérieure pour les digestats liquides ($211 \text{ mg N g}^{-1} \text{ N}_{\text{org}}$), mais avec seulement deux échantillons il est difficile de généraliser ce résultat.

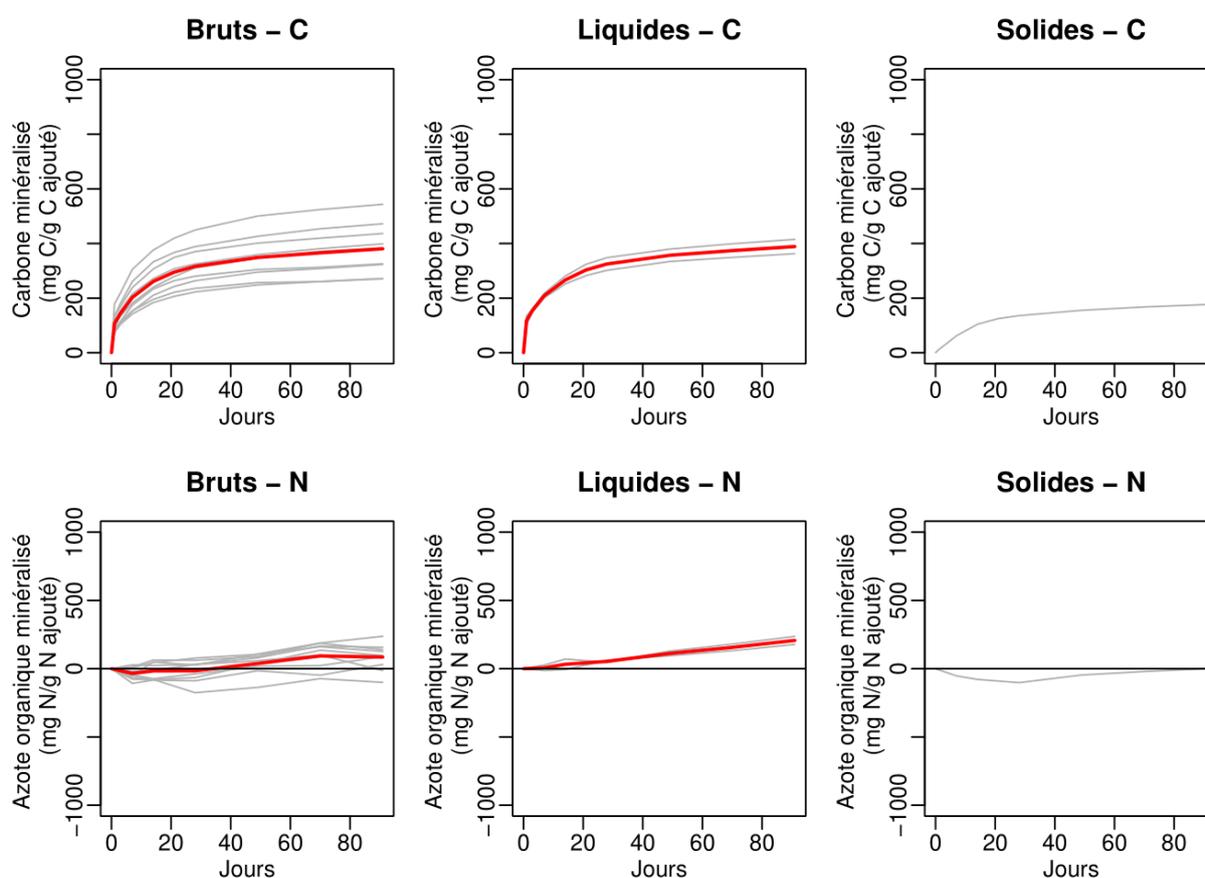


Figure 4 : Cinétique de minéralisation en laboratoire du carbone et de l'azote organique des digestats bruts ($n=9$), liquides ($n=2$) et solides ($n=2$). Chaque ligne grise représente un digestat, tandis que les lignes rouges représentent la moyenne de chaque type de digestat.

5.4 Apports de nutriments

Le Tableau 5 présente les apports moyens pour des doses usuelles de digestat. Les apports d'azote total sont notables avec digestat brut et liquide, de l'ordre de grandeur des besoins en azote d'un blé. Les apports d'azote disponible sont également conséquents (120 kg N/ha pour les digestats bruts), mais assez variables (écart-type de 29 kg N/ha), soulignant l'intérêt de bien connaître la composition du digestat pour piloter la fertilisation. Tout cet azote disponible n'est cependant pas efficace pour la culture. Cette efficacité dépendra notamment des pertes par volatilisation de la fraction ammoniacale et de la minéralisation réelle de la fraction organique (qui peut être différente de celle estimée en

laboratoire). Ces apports d'azote sont très inférieurs suite à un épandage de digestat solide (dose moindre également). Les apports de phosphore sont non négligeables et équivalents entre un apport de digestat brut et un apport de digestat solide à dose usuelle (55 et 59 kg P₂O₅/ha respectivement). Le digestat solide apportera par contre moins de potasse que les digestats bruts et liquides.

Tableau 5 : Apport moyen (et écart-type) pour des doses usuelles de digestat

Paramètres	Digestat brut 40 m ³ /ha	Digestat liquide 40 m ³ /ha	Digestat solide 10 t/ha
N total (kg/ha)	199 (38)	223 (47)	52 (4)
N organique (kg/ha)	85 (15)	81 (22)	48 (4)
N ammoniacal (kg/ha)	113 (35)	141 (24)	4 (2)
N disponible (kg/ha) ¹	120 (29)	157 (25)	3 (2)
P ₂ O ₅ (kg/ha)	55 (24)	76 (68)	59 (1)
K ₂ O (kg/ha)	162 (26)	174 (27)	46 (12)

¹ N ammoniacal + N organique × % N organique minéralisé après 90 jours d'incubations

6 Simulation des performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture

6.1 Définition des scénarios

6.1.1 Type de sol

La plupart des exploitations enquêtées cultivent des sols majoritairement limoneux à limoneux argileux, profonds, peu caillouteux, drainés ou non (Tableau 6). Ces sols à fort potentiel, avec notamment une bonne réserve utile, se prêtent bien à la culture de CIVE. Une exploitation seulement a des sols plus sableux et superficiels, mais le potentiel des sols est compensé par l'irrigation. Les sols argilo-calcaires sont souvent peu concernés par la méthanisation : peu de CIVE y sont produits (potentiel plus faible du fait d'une réserve utile plus limitée) et peu de digestat y est épandu (le méthaniseur étant souvent à proximité des terres à fort potentiel). Un scénario de sol majoritaire a donc été retenu pour la modélisation, correspondant à un limon des plateaux typiques, tandis qu'un scénario alternatif correspond à des sols sableux superficiels caillouteux nécessairement irrigués (Tableau 6).

Tableau 6 : Caractéristiques des sols simulés

Paramètre		Limons des plateaux	Sols sableux superficiels
Profondeur (cm)		120	80
Caractéristiques du 1 ^{er} horizon	Argile (%)	17	7
	Limons fins (%)	30	20
	Limons grossiers (%)	50	25
	Sables (%)	3	48
	Calcaire (%)	0	0
	pH	7	6.5
	Matière organique (%)	2.0	2.2
Pierrosité (%)	0	20	

6.1.2 Données climatiques

Un seul scénario climatique est considéré dans les simulations, correspondant au climat moyen de la période 2010-2019 pour les simulations à long terme de la matière organique, tandis que la variabilité climatique sur cette même période sera considérée pour simuler les dynamiques de l'azote (une simulation pour chaque année climatique de la période). La station climatique de Trappes (78) est prise comme référence. Cette station n'est pas située à proximité immédiate des méthaniseurs enquêtés (entre 30 et 100 km), l'objectif n'est cependant pas de reproduire précisément le climat d'une année particulière pour un site particulier, mais d'avoir une idée des effets de la variabilité interannuelle du climat d'Ile-de-France sur les performances des systèmes de culture associés à la méthanisation sans élevage.

Afin d'approcher l'effet du changement climatique, tout du moins tel que ressenti ces dernières années par les agriculteurs avec des étés plus secs, des simulations avec les données climatiques d'années à été sec ont également été réalisées (2003, 2006, 2015, 2020).

6.1.3 Assolement et succession de cultures

L'ensemble des exploitations enquêtées sont des exploitations de grandes cultures et betteravières, mais des différences d'assolement existent. L'objectif de l'étude n'est pas de représenter ces différences, mais plutôt les changements induits par la méthanisation. Si on se concentre sur ces changements, le point principal est une baisse moyenne de la sole en blé de 13% de SAU (Figure 5)

(allant de -43% de SAU à 0%) compensée par une hausse de 18% de SAU de la sole en orge (de 0 à +41%). Ce changement vise à cultiver davantage de CIVE d'été suite à la moisson d'orge d'hiver plus précoce que celle du blé. On remarque également une diminution de la sole en colza de 5% de SAU (-12% à 0). Par ailleurs, d'après les enquêtes, le colza reste principalement cultivé sur les petites terres non concernées par la méthanisation. La quasi stabilité de la SAU en maïs grain masque des disparités importantes entre exploitations : de sa disparition chez des exploitants se concentrant sur les CIVE d'été à une forte augmentation chez des exploitants cultivant davantage de CIVE d'hiver, le maïs grain étant la culture principalement cultivée après CIVE d'hiver. L'augmentation de la culture des légumes de plein champ peut également être appuyée par la méthanisation (introduction de CIVE d'été après pois de conserve par exemple). Cette situation ne concerne cependant que peu d'enquêtés et est remise en question du fait de la fragilité des filières (d'après les enquêtes). Les autres changements de SAU sont inférieurs à +/- 5% de SAU en moyenne et peu en rapport avec la méthanisation d'après les enquêtes. On peut toutefois noter la réintroduction de pois d'hiver jusqu'à 10% de l'assolement sur une exploitation pour permettre la culture de CIVE d'été à la suite.

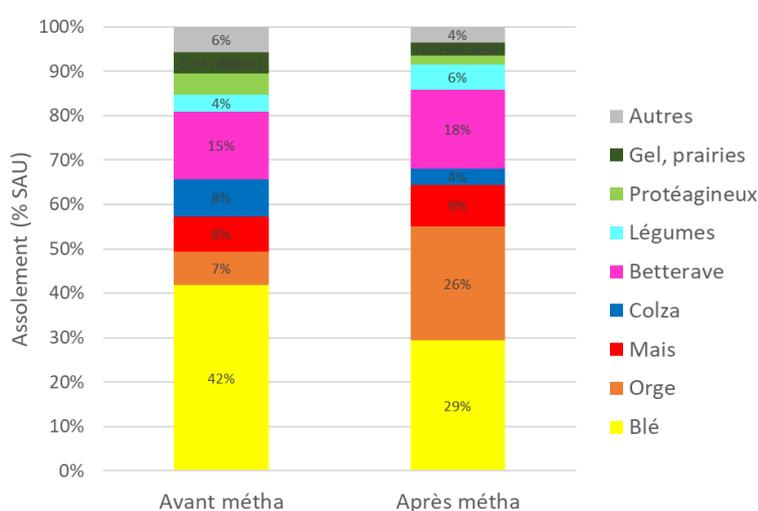


Figure 5 : Assolement moyen des exploitations enquêtées (ou non enquêtées mais identifiées comme associées au méthaniseur) avant et après méthanisation (d'après le registre parcellaire graphique 2007-2019) (moyenne de 15 exploitations).

Concernant les CIVE, leur importance dans les assolements est assez variable entre les différents exploitants enquêtés, variant entre 20% et 75% de la SAU environ, avec une moyenne à 35%. Parmi ces 35%, la part de CIVE d'été est majoritaire (25% en moyenne, variant de 10 à 35% environ), notamment à la suite de l'orge d'hiver grain cultivée en remplacement du blé. La part de CIVE d'hiver varie entre 0 et 35% (moyenne de 10%), avant maïs grain principalement.

Les cultures minoritaires qui ne se retrouvent que chez une partie des enquêtés et n'ont pas de lien direct avec la méthanisation (pas de changements de pratiques ou de surface) n'ont pas été représentés dans les scénarios. Ainsi, l'assolement type avant et après méthanisation comprend uniquement du blé, de l'orge d'hiver, du maïs, du colza et de la betterave sucrière. La succession type permettant de respecter approximativement les proportions moyennes de ces cultures dans les assolements avant méthanisation est : **betterave – blé – blé – maïs grain – blé – colza – blé – betterave – blé – orge d'hiver**.

Par rapport à cette rotation de base avant méthanisation quatre scénarios de changement d'assolement et d'introduction de CIVE correspondant ont été considérés (Tableau 7) :

- **peu de CIVE** : remplacement de la première CIPAN avant betterave par une CIVE d'été et du blé en année 2 par une orge d'hiver suivi d'une CIVE d'été
- **scénario de base après méthanisation** : remplacement de la première CIPAN avant betterave par une CIVE d'été, remplacement des blés en année 2 et 7 par une orge d'hiver suivi de CIVE d'été et remplacement de la CIPAN avant maïs grain par une CIVE d'hiver,
- **introduction de pois** : remplacement de la première CIPAN avant betterave par une CIVE d'été, remplacement des blés en année 2 et 7 par une orge d'hiver suivi d'une CIVE d'été, remplacement de la CIPAN avant maïs grain par une CIVE d'hiver et remplacement du colza par un pois d'hiver suivi d'une CIVE d'été,
- **Plus de CIVE et majoritairement d'hiver** : remplacement de la première CIPAN avant betterave par une CIVE d'été, remplacement du blé en année 2, 7 et 9 par une orge d'hiver suivi d'une CIVE d'été, remplacement de la CIPAN avant maïs grain par une CIVE d'hiver, remplacement du colza par un maïs grain précédé d'une CIVE d'hiver.

Tableau 7 : Successions de culture avant et après méthanisation et assolement correspondant (changement de cultures principales en bleu, changement d'interculture / insertion de CIVE en rouge)

Année	Scénario avant métha	Scénarios après méthanisation			
		Base	Peu de CIVE	Pois + CIVE d'été	Plus de CIVE (hiver)
1	CIPAN	CIVE d'été	CIVE d'été	CIVE d'été	CIVE d'été
	Betterave	Betterave	Betterave	Betterave	Betterave
2	Blé	Orge d'hiver	Orge d'hiver	Orge d'hiver	Orge d'hiver
		CIVE d'été	CIVE d'été	CIVE d'été	CIVE d'été
3	Blé	Blé	Blé	Blé	Blé
4	CIPAN	CIVE d'hiver	CIPAN	CIVE d'hiver	CIVE d'hiver
	Maïs grain	Maïs grain	Maïs grain	Maïs grain	Maïs grain
5	Blé	Blé	Blé	Blé	Blé
6	Colza	Colza	Colza	Pois d'hiver	CIVE d'hiver
				CIVE d'été	Maïs grain
7	Blé	Orge d'hiver	Blé	Blé	Orge d'hiver
8	CIPAN	CIVE d'été	CIPAN	CIPAN	CIVE d'été
	Betterave	Betterave	Betterave	Betterave	Betterave
9	Blé	Blé	Blé	Blé	Orge d'hiver
					CIVE d'été
10	Orge d'hiver	Orge d'hiver	Orge d'hiver	Orge d'hiver	Orge d'hiver
Assolement correspondant (cultures principales)					
Blé	50%	30%	40%	40%	20%
Orge d'hiver	10%	30%	20%	20%	40%
Betterave	20%	20%	20%	20%	20%
Maïs grain	10%	10%	10%	10%	20%
Colza	10%	10%	10%	0%	0%
Pois d'hiver	0%	0%	0%	10%	0%
Assolement correspondant (interculture)					
CIPAN	30%	10%	20%	10%	0%
CIVE d'été	0%	30%	20%	30%	40%
CIVE d'hiver	0%	10%	0%	10%	20%

6.1.4 Conduite des CIVE d'été

6.1.4.1 Type de CIVE

Le maïs ensilé est la CIVE quasi unique en été. Plusieurs enquêtés font ou ont fait des tests en sorgho, tandis qu'un enquêté teste des mélanges. **Le scénario de base après méthanisation considère uniquement du maïs ensilé en CIVE d'été.** Le test du mélange n'est pas possible avec l'outil de simulation.

6.1.4.2 Fertilisation

La quasi-totalité des exploitants enquêtés a déclaré fertiliser le maïs CIVE avec de l'azote liquide, enfoui ou non (et un engrais starter 18-46 au semis), pour une centaine d'unités d'azote environ. Deux exploitants ont déclaré une fertilisation moindre ou nulle. Même si l'apport de digestat n'a été que rarement relevé sur maïs CIVE, il est intéressant de l'étudier (dans une optique de bouclage des flux où le digestat fertilise la CIVE). **Quatre scénarios de fertilisation du maïs CIVE sont donc testés :**

- pas de fertilisation (scénario commun avec le scénario sans phyto sur CIVE impliquant un objectif de rendement divisé par deux),
- dose ajustée automatiquement aux besoins par le modèle (scénario de base),
- 100 kg N/ha en azote liquide enfoui au strip-till
- apport de digestat enfoui rapidement le jour même (40 m³/ha).

6.1.4.3 Protection phytosanitaire

La plupart des enquêtés a déclaré une protection phytosanitaire du maïs CIVE, en général bien inférieure à celle d'un maïs grain, mais allant d'une absence de protection phytosanitaire à un itinéraire proche de celui du maïs grain. Les scénarios sont ici :

- un demi IFT de maïs grain pour le maïs CIVE (scénario de base),
- absence de protection phytosanitaire (scénario commun avec le scénario sans fertilisation sur CIVE impliquant un objectif de rendement divisé par deux).

6.1.4.4 Irrigation

Environ la moitié des exploitants enquêtés déclare irriguer le maïs CIVE, si besoin 1 à 3 tours d'eau de 20 à 30 mm chacun sont généralement pratiqués. **Deux scénarios sont considérés : une absence d'irrigation (scénario de base) ou deux tours d'eau de 25 mm chacun** (juste après le semis et 15 jours après).

6.1.4.5 Rendement

Les rendements annoncés en CIVE d'été sont très variables selon les années climatiques. Ils n'existent par contre que peu de différences entre exploitations selon les enquêtes (quelles que soient les modalités d'irrigation, de fertilisation ou de protection phytosanitaire). Le rendement moyen annoncé est de 6 t MS/ha pour presque toutes les exploitations, avec une variabilité interannuelle de 0 à 12 t MS/ha. **Ce rendement moyen de 6 t MS/ha est donc retenu pour le scénario de base comme objectif de rendement**, le rendement « réellement » réalisé étant simulé par l'outil. L'objectif de rendement pour le scénario avec irrigation de la CIVE d'été est de 8 t MS/ha.

6.1.5 Conduite des CIVE d'hiver

6.1.5.1 Type de CIVE

L'orge d'hiver ensilé est la CIVE d'hiver très majoritaire parmi les enquêtés et correspond donc au scénario de base. Le seigle cultivé par quelques enquêtés n'est pas simulable par l'outil, il pourrait correspondre cependant au scénario de CIVE moins intensif en intrants détaillés ci-dessous.

6.1.5.2 Fertilisation

La fertilisation de l'orge d'hiver CIVE est globalement assez proche de celle de l'orge d'hiver grain chez la plupart des enquêtés. La dose d'azote efficace apportée est de l'ordre de 160 kg N/ha, en deux apports, avec potentiellement le 2^e apport réalisé avec du digestat. Pour l'apport de digestat, l'hypothèse la plus courante est celle de 50% d'efficacité (représentant environ 100 kg N efficace/ha pour 40 m³/ha d'apport). **Trois scénarios de fertilisation de l'orge sont donc testés :**

- pas de fertilisation minérale, uniquement un apport de digestat (40 m³/ha),
- un apport de digestat (40 m³/ha) et dose d'azote minéral complémentaire ajustée automatiquement aux besoins par le modèle (scénario de base),
- apport de 60 kg N/ha en engrais minéral en 1^{er} apport suivi de 40 m³/ha avec digestat.

6.1.5.3 Protection phytosanitaire

L'ensemble des enquêtés a déclaré une protection phytosanitaire de l'orge CIVE, avec des pratiques s'échelonnant d'une protection équivalente à la moitié environ de celle d'une orge grain à la totalité. **Le scénario de base testé correspond donc à un demi IFT d'orge grain pour l'orge CIVE**, avec un scénario alternatif correspondant à une absence de protection phytosanitaire (avec un objectif de rendement divisé par deux).

6.1.5.4 Date de récolte

Les scénarios avec orge CIVE sont construits avec une date de récolte au 15 mai. Cette récolte tardive retarde le semis du maïs grain suivant et entraîne une perte de rendement du maïs grain estimée environ à 20% par les enquêtés (perte également attribuable à une réserve hydrique du sol diminuée).

Un scénario teste une récolte plus précoce de l'orge CIVE au 20 avril, afin de limiter la perte sur le maïs grain suivant. Cette récolte plus précoce est associée à un objectif de rendement plus faible d'orge CIVE (cf. point suivant).

6.1.5.5 Rendement et impact sur la culture suivante

Les rendements enquêtés d'orge d'hiver CIVE sont assez peu variables entre les enquêtés avec une moyenne à 10 t MS/ha (et un écart-type de 1 t MS/ha). **Ce rendement moyen à 10 t MS/ha est retenu comme objectif de rendement**, le rendement « réellement » réalisé étant simulé par l'outil. L'effet d'une absence de protection phytosanitaire (combinée à une fertilisation uniquement organique) est estimé diviser par deux l'objectif de rendement.

L'ensilage de l'orge CIVE est réalisé à la mi-mai, ce qui retarde le semis du maïs grain suivant chez la totalité des enquêtés et entraîne une perte de rendement du maïs grain estimée environ à 20% par les enquêtés. **Les scénarios avec CIVE d'hiver inclut donc une réduction de l'objectif de rendement sur le maïs grain suivant de 20%**, la perte « réelle » étant estimée par modélisation). Le scénario alternatif avec une récolte au 20 avril est construit avec un objectif de rendement ramené à 7 t MS/ha, avec une baisse de l'objectif de rendement du maïs grain suivant limitée à 10%. Cette baisse est aussi considérée limitée à 10% dans le cas d'une irrigation du maïs grain suivant CIVE.

6.1.6 Cultures dédiées

Seuls trois enquêtés ont déclaré cultiver des cultures dédiées pour le méthaniseur : généralement une orge ensilée suivi d'un maïs ensilé (l'une des deux cultures faisant office de CIVE, l'autre de culture dédiée). La proportion de cultures dédiées dans l'assolement n'est pas connue avec précision. Sa proportion dans l'approvisionnement du méthaniseur ne dépassant généralement pas les 10%, en comparaison aux CIVE dont la proportion dans le méthaniseur oscille autour de 50% et la part dans la SAU autour des 35%. La part de SAU en cultures dédiées est donc considérée inférieure à 10%. **Le scénario de base après méthanisation ne comprend donc pas de cultures dédiées**, tandis que deux

scénarios alternatifs considèrent soit l'ensilage du maïs suivant la CIVE d'hiver en année 4 (soit 10% de la SAU en cultures dédiées), soit l'ensilage du maïs en année 4 (avec un précédent CIPAN).

6.1.7 Travail du sol

La plupart des exploitants enquêtés ont des pratiques de travail du sol mixte, alternant labour et travail simplifié. Seuls trois exploitants ne labourent plus, en maintenant cependant un travail superficiel. L'implantation du maïs CIVE est par contre très majoritairement pratiquée après strip-till. **Le scénario de base combine donc labour occasionnel (culture de printemps) et travail simplifié (cultures d'hiver), avec strip-till pour maïs CIVE ou grain derrière CIVE d'hiver.**

Un scénario sans labour (mais travail superficiel) en lien avec une introduction des couverts importante avant méthanisation sera simulé pour comparer les résultats avec méthanisation à une situation sans méthanisation approchant les principes de l'agriculture de conservation (situation chez deux enquêtés).

6.1.8 Interculture hors CIVE

Hormis les intercultures couvertes avec des CIVE, le cas de figure majoritaire enquêté correspond à **une couverture par CIPAN des intercultures longues et à un sol nu pour les intercultures courtes (scénario de base)**. Deux cas de figures alternatifs ont été rencontrés, une couverture des sols en interculture courte d'une part, et une absence de couverture en interculture longue d'autre part (dérogation). Ces trois cas de figure sont simulés.

6.1.9 Epandage de digestats

La part moyenne de SAU épandue chaque année est estimée à 60% environ sur l'ensemble des exploitations enquêtées. Cette part varie cependant entre 25% et 75% environ, sans lien direct avec la part de CIVE dans l'assolement, la quantité de digestat épandu dépendant fortement de la quantité de matières extérieures à l'exploitation méthanisées. Trois scénarios d'épandage sont donc retenus dans les simulations : épandage trois années sur 10, **épandage cinq années sur dix (scénario de base)**, ou sept années sur dix.

Les deux principaux créneaux d'épandage correspondent au premier et au deuxième apport d'azote sur céréales en sortie d'hiver (céréales grain ou CIVE). Un autre créneau correspond à un épandage avant semis de CIPAN (avec enfouissement rapide). Un créneau possible (quoique peu pratiqué) correspond à un apport avant semis de maïs CIVE (avec enfouissement rapide). Ces quatre périodes d'épandage sont simulées, **le scénario de base correspondant à l'épandage en 2^e apport sur céréales.**

Le scénario de base n'inclut pas de séparation de phase (situation majoritaire chez les enquêtées). Un scénario avec séparation de phase est testé : épandage de digestat liquide avec les mêmes modalités que le digestat brut et épandage de digestat solide sur chaumes.

6.1.10 Fertilisation minérale azotée des cultures principales

Les pratiques de fertilisation minérale sont considérées ajustées aux besoins des cultures (principales et CIVE) dans le scénario de base, les effets d'un déséquilibre de fertilisation sur les cultures principales n'étant pas l'objet de l'étude. Un scénario alternatif teste cependant une fertilisation minérale fixe sur les CIVE (cf. paragraphes sur les CIVE).

6.1.11 Fertilisation minérale PK

Les pratiques de fertilisation minérale PK n'ont pas été enquêtées dans le détail. Elles sont cependant assez variables entre exploitations, notamment selon la présence de cultures exigeantes (betteraves, légumes...) et les réserves du sol. Les enquêtés ont globalement déclaré des économies d'engrais PK suite aux apports de digestats, voire un arrêt complet de la fertilisation de fond PK (hors engrais starter

P). **Dans tous les scénarios simulés, les apports de PK par le digestat sont soustraits des besoins à 100%**; en considérant des besoins des cultures égaux à leurs exportations.

6.1.12 Autre fertilisation organique

La plupart des enquêtés n'utilisaient pas d'autres fertilisants ou amendements organiques avant méthanisation et n'en utilisent toujours pas après méthanisation, ce qui correspondra aux scénarios de base avant et après méthanisation. Certains utilisaient du compost de déchets verts avant méthanisation, ce qui fera l'objet d'un scénario alternatif intéressant à tester pour comparer les effets sur la matière organique du sol notamment (compost de déchets verts à 30 t/ha tous les 4 ans).

6.1.13 Protection phytosanitaire hors CIVE

Aucun changement dans la protection phytosanitaire des cultures hors CIVE n'a été mis en avant lors des enquêtes. **Les pratiques phytosanitaires moyennes d'Ile-de-France par culture sont considérées dans l'ensemble des scénarios** (IFT moyen Ile-de-France). Ainsi, seules les applications de phytosanitaires sur CIVE ou les changements de culture principale induiront des changements d'IFT.

6.1.14 Irrigation hors CIVE

Une petite moitié des enquêtés n'a pas de possibilité d'irrigation. Chez les exploitations équipées, l'irrigation est principalement en place pour les légumes et la pomme de terre (non représentés dans nos scénarios), et dans une moindre mesure pour la betterave sucrière et le maïs grain. Dans le **scénario de base sur limons profonds, aucune irrigation des cultures principales** n'est considérée, tandis que l'irrigation du maïs grain et de la betterave sucrière est considérée dans le scénario avec sols sableux. Une irrigation du maïs grain suivant la CIVE d'hiver est aussi envisagée en scénario alternatif pour atténuer la perte de rendement due à l'assèchement du sol par la CIVE (scénario commun avec le scénario d'irrigation de la CIVE d'été).

6.1.15 Objectif de rendement des cultures principales

Les rendements enquêtés sont assez élevés du fait de sols à fort potentiel, globalement plus élevés que les moyennes régionales pour les céréales. Les rendements de la betterave sucrière, du colza et du pois ont été ajustés après discussion avec les agriculteurs enquêtés pour tenir compte des baisses de rendement récentes (problématique ravageurs). Les hypothèses moyennes selon le type de sol sont indiquées dans le Tableau 8. En cas d'insertion de CIVE d'hiver avant le maïs grain, des baisses d'objectif de rendement sont prises en compte pour le maïs grain (cf. paragraphe 6.1.5.5).

Tableau 8 : Rendement des cultures principales

Cultures	Sols limoneux profonds	Sols sableux superficiels
Blé	90 qx/ha	80 qx/ha
Orge d'hiver	90 qx/ha	80 qx/ha
Colza	32 qx/ha	30 qx/ha
Maïs grain (sec)	100 qx/ha (sec)	100 qx/ha (irrigué)
Betterave sucrière	80 t/ha	80 t/ha (irriguée)
Pois d'hiver	40 qx/ha	-

6.1.16 Récapitulatif des scénarios de modélisation

Le Tableau 9 récapitule l'ensemble des scénarios simulés.

Tableau 9 : Récapitulatif des scénarios proposés pour la simulation des systèmes de culture

Thème	Numéro	Descriptif
Avant méthanisation	1	Scénario de base avant métha (voir texte pour la description complète)
	2	Scénario de base avant métha sur sols sableux
	3	Interculture longue non couverte avant métha
	4	ACS avant métha : non labour, interculture courte couverte et interculture longue + productive
	5	Epannage de compost de déchets verts avant méthanisation
Base après méthanisation	6	Scénario de base après métha (voir texte pour la description complète)
	7	Scénario de base après métha sur sols sableux
Climat	8	Sécheresse estivale
Insertion des CIVE	9	Peu de CIVE
	10	Introduction de pois d'hiver + CIVE d'été à la place du colza
	11	Plus de CIVE et majorité de CIVE d'hiver (colza et 1 betterave remplacée par maïs grain)
Conduite des CIVE (hors fertilisation)	12	CIVE bas intrant : sans fertilisation minérale ni phyto, avec rendement /2
	13	Irrigation de la CIVE d'été et du maïs grain suivant CIVE d'hiver (+ rendement)
	14	Récolte plus précoce de la CIVE d'hiver pour ne pas pénaliser la culture alimentaire suivante
Cultures dédiées	15	10% de cultures dédiées dans la SAU : ensilage de l'orge hiver et du maïs suivant
	16	10% de cultures dédiées dans la SAU : ensilage du maïs en culture principale (CIPAN avant)
Gestion du digestat et fertilisation complémentaire	17	Epannage de digestat 3 année sur 10
	18	Epannage de digestat 7 années sur 10
	19	Epannage en 1 ^{er} apport N de céréales
	20	Epannage avant CIPAN (+ enfouissement) (sur scénario 6 avec peu de CIVE)
	21	Epannage avant maïs CIVE
	22	Séparation de phase
	23	Fertilisation non ajustée des CIVE (100 kg N/ha sur CIVE d'été, 160 kg N/ha sur CIVE d'hiver)

6.2 Résultats de simulation

Les paragraphes ci-après indiquent les principaux résultats de simulation. Les résultats détaillés par scénario sont présentés en annexe 2.

6.2.1 Diversité des familles cultivées

L'indicateur de diversité des familles cultivées est un indicateur très simple permettant de donner un aperçu de la diversification des assolements, cette diversification étant généralement considérée comme une des bases de l'agroécologie, permettant une moindre pression des adventices, pathogènes et ravageurs (Bézat et al., 2016).

La diversité des familles cultivées était moyenne avant méthanisation, avec une prépondérance des graminées (Figure 6). Cette diversité des familles cultivées tend à légèrement diminuer avec

l'augmentation des graminées dans les successions de culture (orge CIVE, maïs CIVE), au détriment de couverts d'interculture plus variés, et ceci plus particulièrement quand on augmente la fréquence des CIVE, notamment d'hiver (avec la disparition du colza). A l'inverse, l'introduction du pois (suivi d'une CIVE d'été) peut permettre de maintenir une diversité comparable à la situation avant méthanisation.

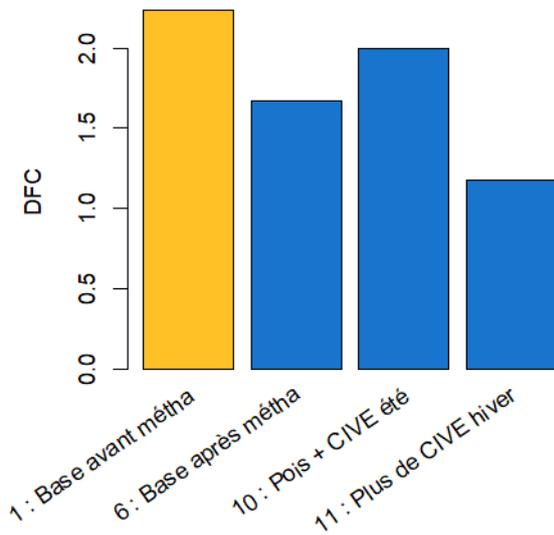


Figure 6 : Indice de diversité des familles cultivées (DFC) pour les scénarios de base avant et après méthanisation et les scénarios après méthanisation avec introduction du pois ou avec une forte proportion de CIVE d'hiver

6.2.2 Diversité des périodes d'implantation

L'indicateur de diversité des périodes d'implantation permet d'évaluer l'effet de la diversification des dates de semis sur le contrôle de la pression de la flore adventice (Hirschy et al., 2015). Les systèmes de culture des enquêtés étaient déjà assez diversifiés d'un point de vue des périodes d'implantation avant méthanisation (Figure 7), avec 5 grandes périodes différentes : colza à semis d'automne précoce, céréales à semis d'automne moyennement précoce (avec précédent céréales ou colza), céréales à semis d'automne tardif (avec précédent maïs grain ou betterave), semis de printemps précoce (betterave) et semis de printemps tardif (maïs grain). La méthanisation ne modifie pas cette situation a priori favorable, sauf dans le cas de la suppression du colza (scénario avec introduction du pois ou davantage de CIVE d'hiver). Les systèmes associés à la méthanisation gardent donc un potentiel de maîtrise de la pression de la flore adventice satisfaisant, comme avant méthanisation (la réelle maîtrise dépendant de facteurs complémentaires).

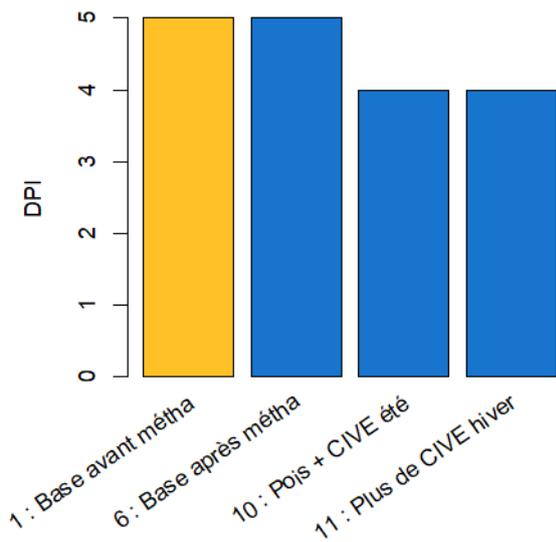


Figure 7 : Indicateur d'effet de la diversité des périodes d'implantation pour les scénarios de base avant et après méthanisation et les scénarios après méthanisation avec introduction du pois ou avec une forte proportion de CIVE d'hiver (valeur maximale = 5).

6.2.3 Durée en sol nu

Une durée en sol nu plus longue peut indiquer des risques d'érosion des sols plus importants, la couverture du sol réduisant fortement celle-ci. L'érosion dépend cependant de nombreux autres facteurs (propriétés du sol, topographie, intensité pluvieuse, etc.). L'indicateur proposé ici considère de plus un sol couvert du semis à la récolte, ce qui est une forte simplification (délai entre le semis et la couverture du sol) et néglige à l'inverse la couverture par les résidus de culture. L'interprétation des effets potentiels est donc à faire avec précaution.

L'introduction des CIVE avec la méthanisation réduit logiquement la durée annuelle moyenne en sol nu, de plus de 20 jours dans le scénario de base (Figure 8), ce qui est a priori bénéfique (cf. commentaire précédent). La réduction est moindre qu'un système en agriculture de conservation où toutes les intercultures (courtes comprises) seraient couvertes.

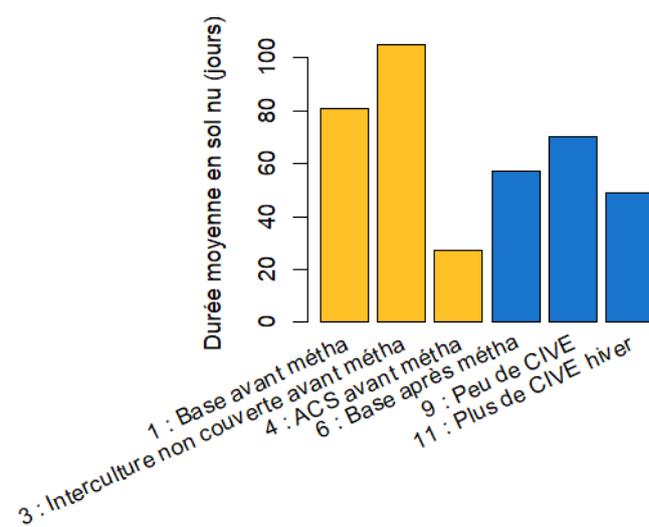


Figure 8 : Nombre de jours moyen annuel en sol nu

6.2.4 Production de biomasse (selon les objectifs de rendement)

D'après les objectifs de rendement retenus, l'introduction de la méthanisation permet une augmentation de la production de biomasse récoltée ou totale, d'autant plus que la fréquence d'insertion des CIVE est grande ou que leur production est intensifiée (irrigation) et inversement (récolte précoce ou CIVE bas intrant) (Figure 9). Le scénario de base après méthanisation permet ainsi des productions de biomasse annuelles moyennes totale et récoltée de 18,7 t MS/ha/an et 11,6 t MS/ha/an, contre 16,7 t MS/ha/an et 8,9 t MS/ha/an avant méthanisation. Cette augmentation de la biomasse produite tient à la production de CIVE qui compense largement la baisse de rendement considérée sur le maïs grain. Elle est sujette à des incertitudes du fait des hypothèses de baisse de rendement du maïs grain retenu (cf. paragraphe suivant 6.2.5). L'hypothèse de rendement de l'orge grain conditionne aussi ces résultats, l'orge grain remplaçant en partie le blé dans les scénarios de méthanisation. Or, des hypothèses de rendement identiques ont été considérées ici selon les enquêtes, alors que les rendements d'orge d'hiver régionaux (75 qx/ha) sont plus faibles que ceux du blé (82 qx/ha) (source : chambre d'agriculture d'Ile-de-France, 2017).

La nature et la destination de cette biomasse récoltée diffère avant et après méthanisation. Il est cependant difficile d'estimer un changement de production alimentaire du fait de la méthanisation, tant les destinations non alimentaires de la biomasse sont déjà présentes avant méthanisation (colza diester...). On peut cependant indiquer que la quantité de biomasse valorisée hors méthanisation diminue avec la méthanisation (baisse de rendement du maïs grain suivant CIVE d'hiver). Cette baisse est atténuée avec une récolte précoce des CIVE d'hiver ou une irrigation du maïs grain suivant la CIVE d'hiver (hypothèse prise à 10% de baisse dans ces deux cas contre 20% sinon).

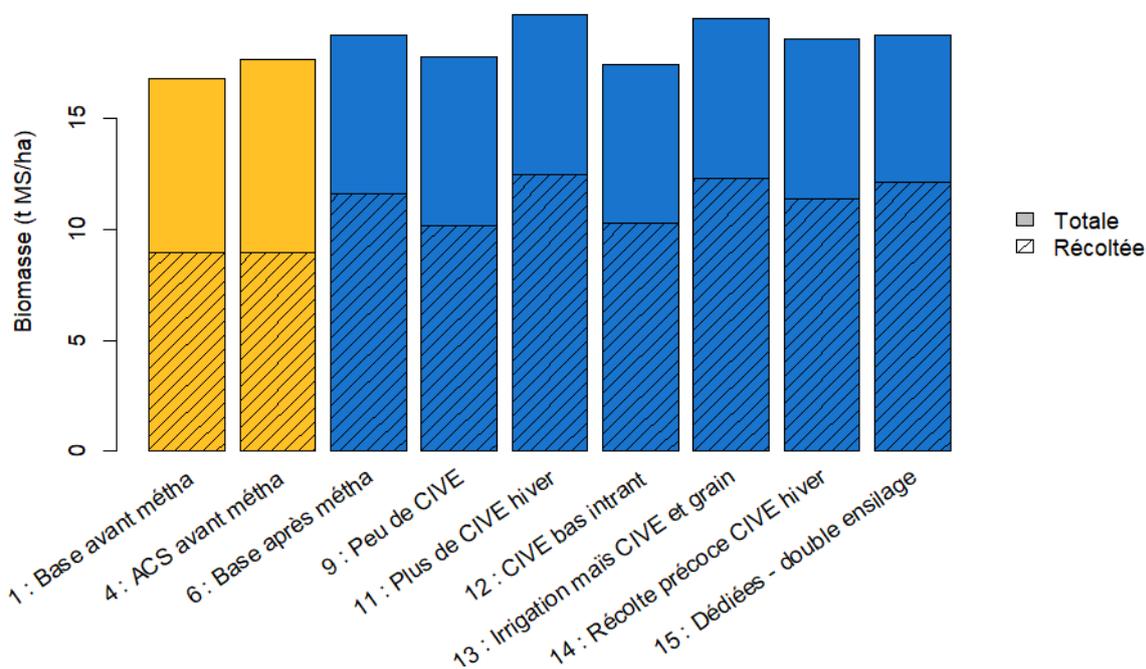


Figure 9 : Production de biomasse moyenne annuelle récoltée et restituée

6.2.5 Variabilité des biomasses de CIVE simulées et des cultures suivantes

N.B. : L'objectif de l'outil PROLEG n'est pas de prédire avec précision le rendement des cultures. Son utilisation ici est de vérifier si les ordres de grandeur des rendements de CIVE enquêtés sont réalistes et à quel point ils sont affectés par des changements de pratiques ou de climat.

En moyenne, la production de maïs CIVE simulée par le modèle est de 5,6 t MS/ha (Figure 10), et est donc proche des hypothèses d'objectif de rendement sorties des enquêtes de 6 t MS/ha. On observe

cependant une forte variabilité de cette production selon les années climatiques considérées : entre 0,8 t MS/ha et 9,7 t MS/ha. Le rendement de l'orge CIVE est plus élevé et moins variable, avec une moyenne de 9,7 t MS/ha, un minimum de 7,4 t MS/ha et un maximum de 15,3 t MS/ha. En contrepartie, le maïs grain suivant l'orge CIVE voit son rendement moyen réduit de 31%, ce qui est supérieur à l'hypothèse retenue de 20% (cf. paragraphe 6.1.5.5).

Sur sables, les rendements de maïs CIVE sont supérieurs (7,2 t MS/ha) et moins variables du fait de l'irrigation systématique (3 tours d'eau de 30 mm), tandis que ceux de l'orge CIVE sont légèrement inférieurs (9,3 t MS/ha) et que le maïs grain suivant est moins impacté du fait de l'irrigation (-20%).

L'irrigation de la CIVE d'été en limons (2 tours d'eau de 25 mm) permet une augmentation du rendement moyen simulé à 6,8 t MS/ha. L'irrigation du maïs grain (2 tours d'eau de 25 mm) suivant la CIVE d'hiver permet aussi de réduire la perte de rendement du maïs grain à 7%.

La récolte précoce de l'orge d'hiver CIVE au 20 avril à la place du 15 mai réduit fortement son rendement moyen à 5,3 t MS/ha (inférieur à l'objectif de 7 t MS/ha). Cette récolte plus précoce permet cependant de limiter la baisse de rendement du maïs grain suivant à 7%.

Avec le scénario sécheresse estivale, le rendement de la CIVE d'été chute drastiquement à 0,9 t MS/ha, tandis que celui de la CIVE d'hiver est beaucoup moins affecté (7,8 t MS/ha). Le rendement du maïs grain suivant la CIVE d'hiver est également fortement diminué (-80%).

Le non ajustement de la fertilisation des CIVE par le modèle (fertilisation fixe et forcée) peut amener à une augmentation du rendement de CIVE certaines années, avec des moyennes passant à 8,9 t MS/ha et 11,9 t MS/ha pour le maïs CIVE et l'orge CIVE, respectivement. Ceci indique que l'objectif de rendement de 6 t MS/ha peut être dépassé certaines années et donc qu'une fertilisation plus forte peut parfois être bénéfique en termes de rendement, malgré certains risques accrus (cf. paragraphes suivants). L'apport de digestat avant maïs CIVE procure les mêmes avantages (7,4 t MS/ha en moyenne).

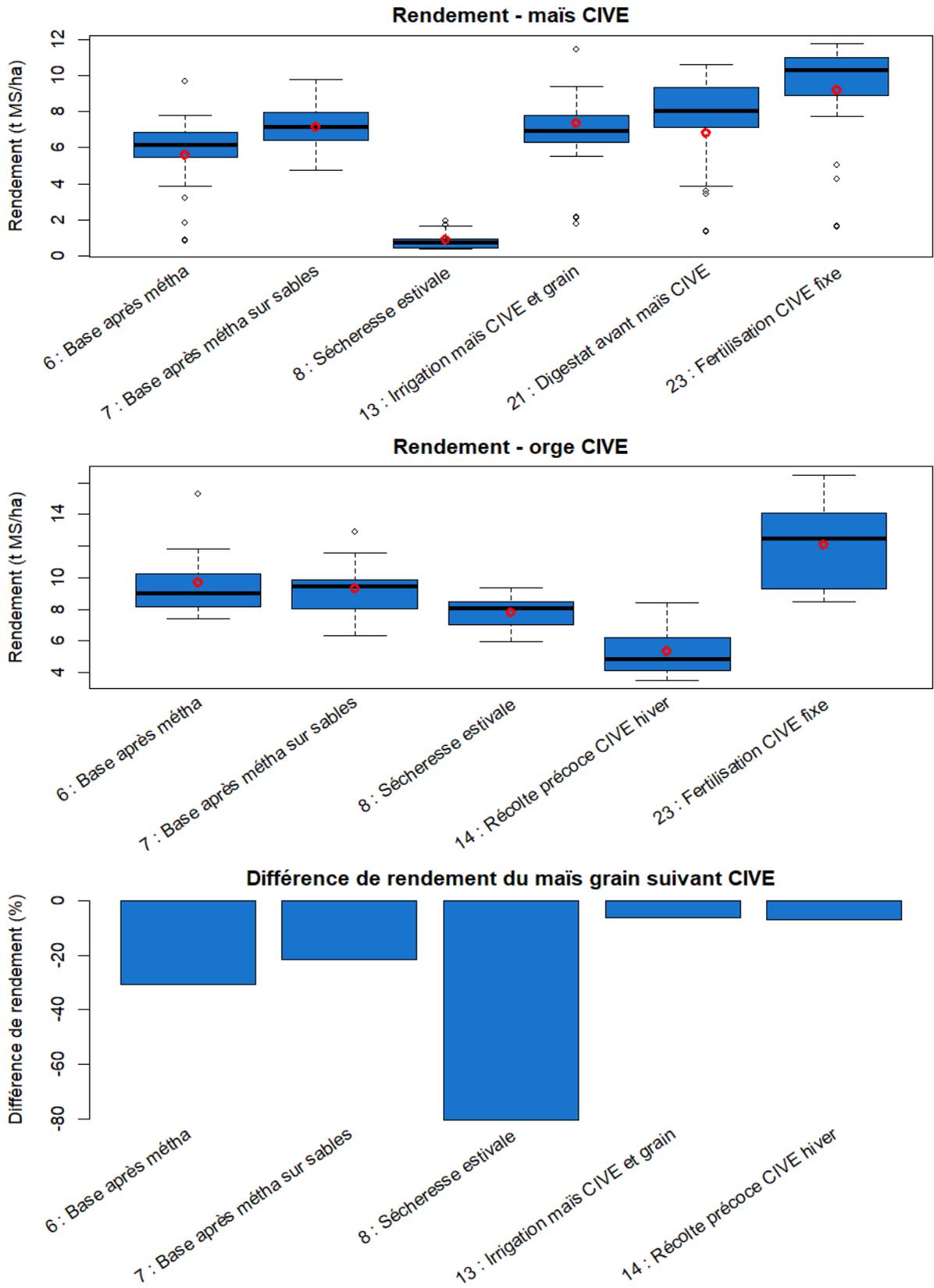


Figure 10 : Rendement du maïs CIVE et de l'orge CIVE et perte de rendement moyenne du maïs grain suivant CIVE selon différents scénarios. Pour chaque scénario, la boîte à moustache représente la variabilité des rendements selon les années climatiques pour l'ensemble des CIVE de la succession, tandis que le point rouge représente le rendement moyen.

6.2.6 Entrées de carbone et stockage de carbone

Les entrées de carbone « humifié » correspondent aux quantités de carbone qui contribueront à l'entretien de la matière organique du sol. Au-delà des quantités de carbone totale, la « qualité » du carbone compte également : à quantité égale, le carbone racinaire contribue davantage que le carbone des résidus de culture et le carbone des digestats contribue davantage que le carbone racinaire et des résidus de culture, selon les formalismes du modèle sol-carbone AMG (Clivot et al., 2019; Levvasseur et al., 2020).

L'introduction de la méthanisation a des effets contraires sur les entrées de carbone humifié dans le sol (Figure 11) :

- Réduction des entrées de carbone associées aux cultures principales du fait d'une baisse du rendement du maïs grain suivant la CIVE d'hiver (moins de racines et de résidus),
- Réduction des entrées de carbone associées aux parties aériennes des couverts du fait de la récolte des CIVE,
- Augmentation des entrées de carbone associées aux parties racinaires des couverts du fait du rendement de CIVE plus important que celui des couverts non récoltés avant méthanisation,
- Augmentation des entrées de carbone liées aux PRO (digestats).

Il en résulte globalement une légère augmentation des entrées de carbone humifié, de l'ordre de 0,2 t C/ha/an, comparable aux entrées de carbone associées à un système sans méthanisation en agriculture de conservation (Figure 11). En comparaison au scénario de base après méthanisation, l'augmentation des CIVE d'hiver et des apports de digestat augmentent ces entrées de carbone (et inversement), tandis que l'introduction de cultures dédiées ou du pois (suivi de CIVE d'été) à la place du colza les réduit. Le scénario avec séparation de phase augmente légèrement les entrées de carbone, mais n'est pas directement comparable : les pratiques simulées ne sont pas forcément à quantités de carbone méthanisé identiques avec ou sans séparation de phase. Dans tous les cas, les différences d'entrée de carbone restent limitées, par exemple en comparaison à l'augmentation induite par des apports de compost.

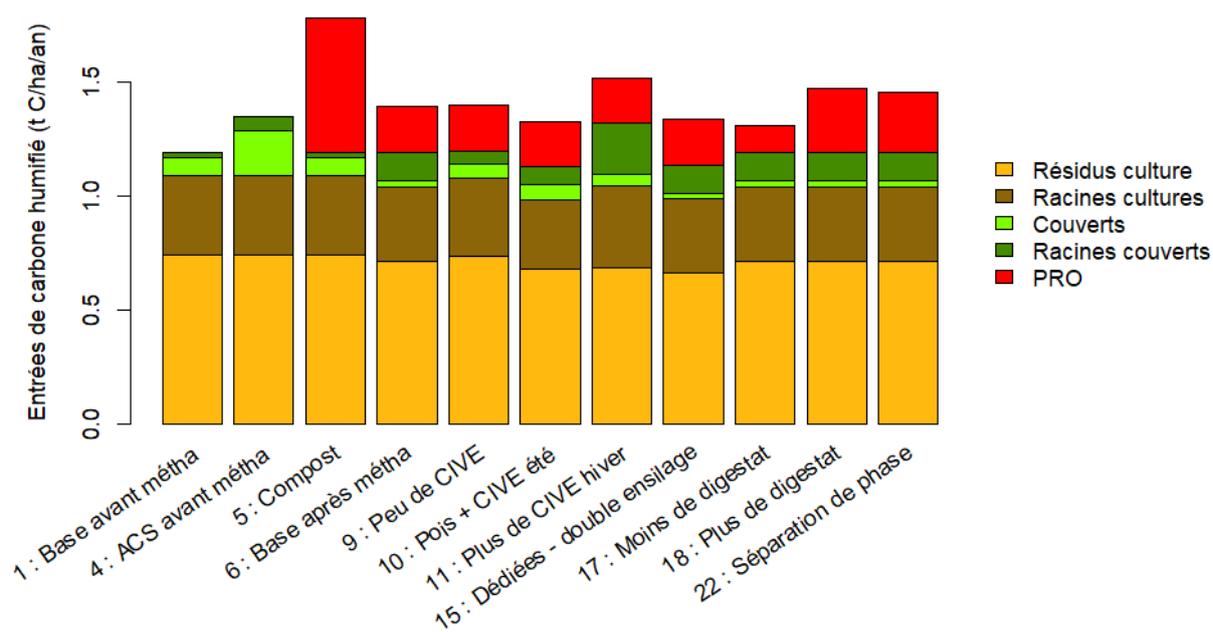


Figure 11 : Entrées moyennes annuelles de carbone humifié dans le sol pour les scénarios de base avant et après méthanisation. PRO = produits résiduels organiques (digestat ou compost ici).

Logiquement, les différences d'entrée de carbone humifié se traduisent par des différences de stockage à 30 ans entre les scénarios (Figure 12). Par rapport au scénario de base avant méthanisation qui est à l'équilibre, l'ensemble des scénarios de méthanisation permet un léger stockage de carbone, d'autant plus fort que la proportion de CIVE d'hiver (à fortes entrées racinaires) et les apports de digestat sont importants. Bien que significative, l'augmentation de stock en 30 ans reste mesurée, comprise entre 3 et 10% du stock initial, soit moins que les objectifs de l'initiative 4 pour 1000 (augmentation des stocks de 0.4% par an). L'augmentation est aussi moindre qu'avec des apports de compost. En lien direct avec ces augmentations modérées, l'augmentation de la teneur en matière organique des sols reste également modérée (de l'ordre de +0.1%). L'effet des pratiques d'ACS est aussi limitée sur la Figure 12, la teneur en matière organique étant considérée sur l'horizon 0-25 cm, alors que l'ACS augmente les teneurs principalement dans les premiers centimètres de sol.

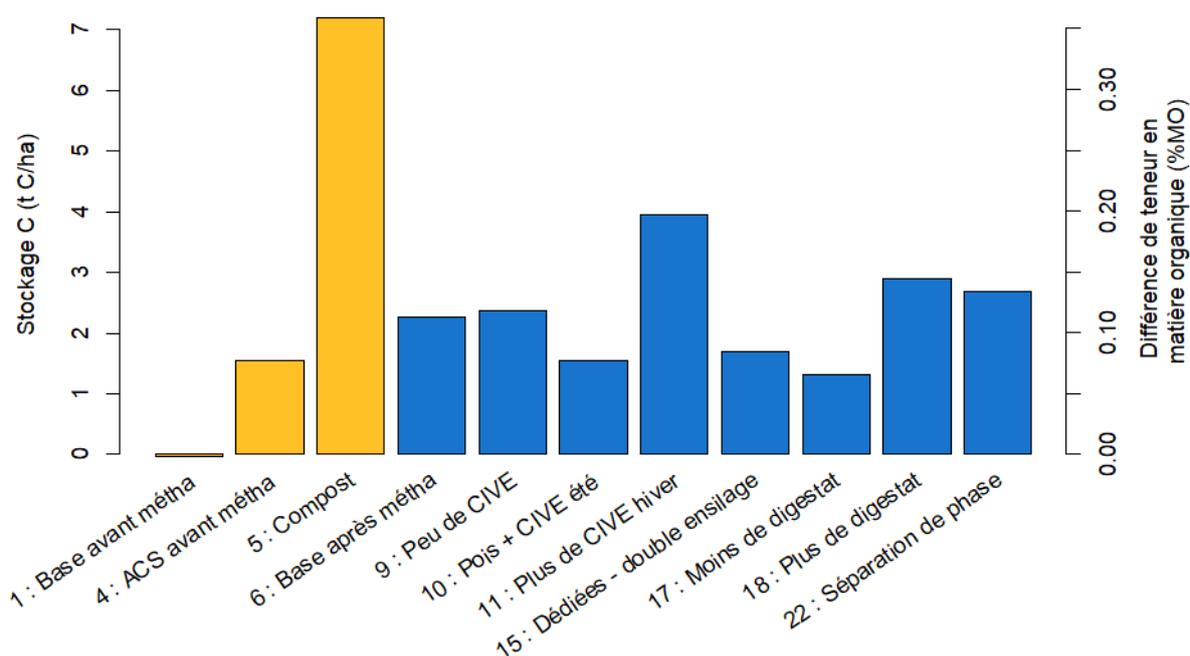


Figure 12 : Stockage de carbone en 30 ans sur l'horizon de surface (0-25 cm) et évolution de la teneur en matière organique du sol correspondante

6.2.7 Effets sur la fertilité du sol

Un certain nombre de propriétés du sol est plus ou moins directement lié à sa teneur en matière organique de surface (battance) ou du premier horizon (0-25 cm) : réserve utile, densité apparente, biomasse microbienne. Du fait des augmentations limitées de ces teneurs en matière organique (cf. paragraphe 6.2.6), ces propriétés évoluent peu, même si une légère baisse de la battance pourrait être attendue. Cependant, cette baisse serait a priori limitée en comparaison à la diminution de la battance dans les systèmes ACS (liée à l'accumulation de matière organique en surface) ou avec compost. Les sols limoneux resteraient assez sensibles à la battance.

Indicateur	1 : Base avant métha	6 : Base après métha	4 : ACS	5 : Compost
Indice de Battance de l'horizon travaillé	2.21 (élevé)	↘ 2.15 (élevé)	↘↘↘ 1.70 * (moyen)	↘↘ 2.02 (élevé)
Réserve utile (mm)	246	≈ 247	≈ 247	≈ ↗ 248
Biomasse microbienne 0-25 cm (mg ADN/g sol)	32.6	↗ 34.0	≈ 33.3	↗ 36.9
Densité apparente 0-25 cm	1.39	≈ 1.38	ND	↘ 1.36

6.2.8 Consommation d'engrais N

Le besoin en engrais minéral azoté moyen annuel pour la situation de base avant méthanisation est estimée à 175 kg N/ha/an (Figure 13) et reste stable à 30 ans du fait de la non évolution de la matière organique du sol. L'introduction de la méthanisation permet une économie d'engrais azotés de l'ordre de 56 kg N/ha/an dès la situation initiale, et une augmentation supplémentaire de 10 kg N/ha/an après 30 ans du fait de l'enrichissement du sol en matière organique (cf. paragraphe 6.2.6). Cette économie d'engrais à court terme est bien supérieure à celle obtenue avec des composts, tandis que l'économie supplémentaire à long terme reste faible par rapport à ce qui est attendu avec des épandages de composts.

L'augmentation de la proportion de CIVE dans les assolements augmentent les besoins en engrais (+10 kg N/ha/an avec beaucoup de CIVE, par rapport au scénario de base après méthanisation), au moins à court terme, la plus forte augmentation de la matière organique du sol à long terme annulant cet effet.

L'introduction du pois (suivi d'une CIVE d'été) permet des économies d'engrais supplémentaires (-15 kg N/ha/an par rapport au scénario de base après méthanisation), tout comme l'épandage de quantités plus importantes de digestat. Le non ajustement de la fertilisation des CIVE (fixe d'après les pratiques moyennes enquêtés) impacte peu les économies d'engrais du fait que les excédents non utilisés par les CIVE profitent aux cultures suivantes (du fait du peu de perte par lixiviation dans ces sols profonds).

L'épandage de digestat sur maïs CIVE étant légèrement moins bien valorisé (volatilisation, cf. section 6.2.13), les économies d'engrais sont légèrement moindres avec ce scénario (7 kg N/ha/an d'économies en moins).

Dans tous les cas, ce sont les épandages de digestats qui sont moteurs des plus grosses économies, notamment grâce à l'import d'azote qu'ils permettent sur les exploitations et leur bonne valeur fertilisante (cf. paragraphe 5.4).

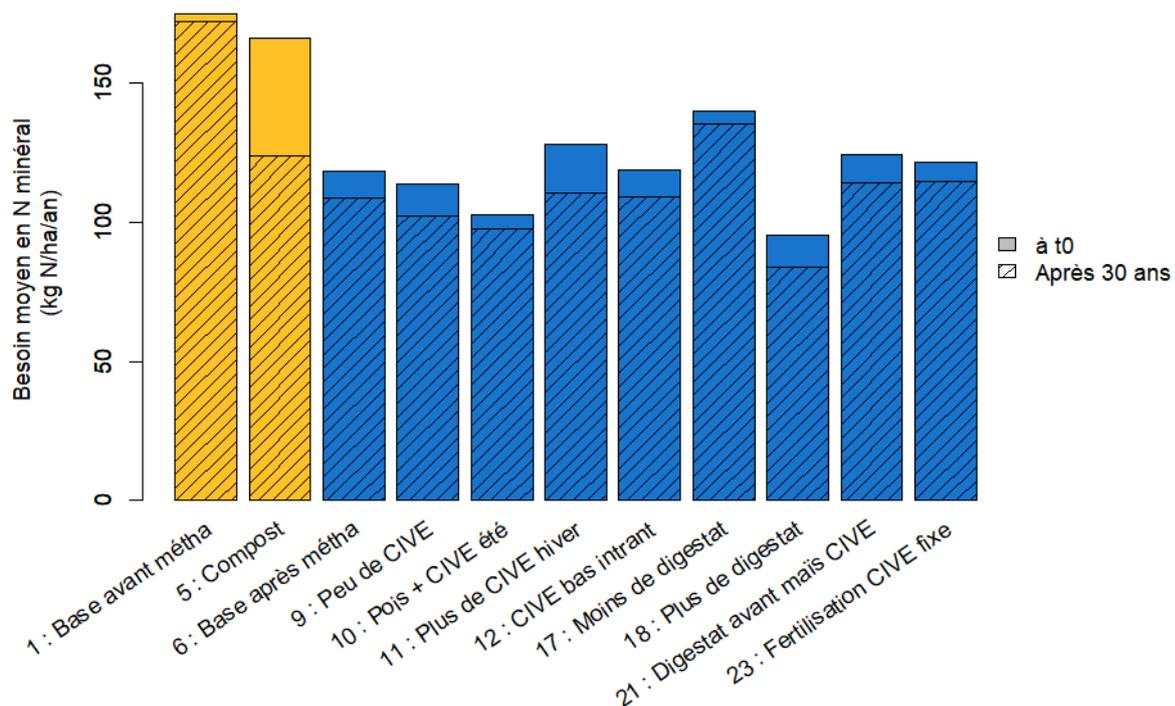


Figure 13 : Besoin en engrais minéral azoté selon les scénarios, pour la situation initiale et après 30 ans de mise en pratique

Si on regarde plus spécifiquement les besoins en engrais minéral N des CIVE, le modèle simule des besoins sur maïs CIVE de 19 kg N/ha en moyenne. En effet, les fournitures du sol par minéralisation permettent de fournir la majorité de l'azote nécessaire à l'atteinte du rendement objectif de 6 t MS/ha. La pratique moyenne enquêtée correspondant à 100 kg N/ha semble donc excédentaire, mais permet d'obtenir un rendement de CIVE supérieur les bonnes années (paragraphe 6.2.5) associé à des pertes légèrement supérieures (paragraphe 6.2.12 et 6.2.13).

Concernant l'orge CIVE qui reçoit déjà un apport de digestat (40 m³/ha, représentant environ 120 kg N/ha disponible, paragraphe 5.4), le modèle simule des besoins en N minéral nul. Là, encore une complémentation minérale fixe de l'ordre de 60 kg N/ha telle qu'enquêtée permet d'obtenir un rendement de CIVE moyen plus élevé (paragraphe 6.2.5) associé à des pertes légèrement supérieures (paragraphe 6.2.12 et 6.2.13).

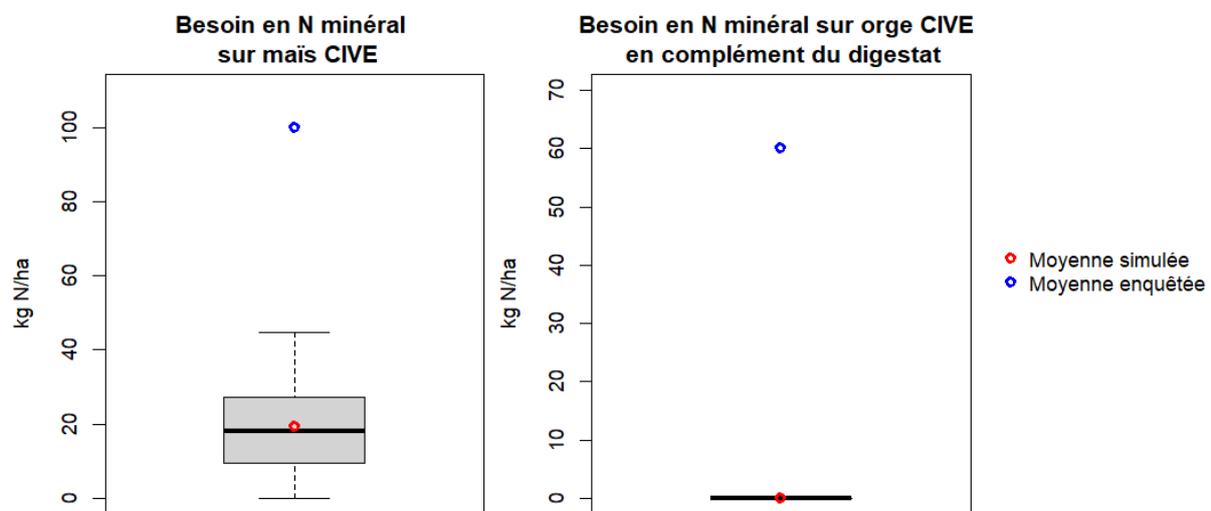


Figure 14 : Besoin en N minéral sur maïs CIVE avec un objectif de rendement de 6 t MS/ha (sans apport de digestat) et sur orge CIVE avec un objectif de rendement de 10 t MS/ha (avec un apport de 40 m³/ha de digestat) (scénario 2 : base après méthanisation)

6.2.9 Bilan PK

L'introduction de la méthanisation augmente les exportations P et K des systèmes de culture, du fait des exportations supplémentaires liées aux CIVE (jusqu'à 17 kg P₂O₅/ha/an et 32 kg K₂O/ha/an dans le scénario avec le plus de CIVE) (Figure 15). Cependant, ces exportations sont plus que compensées du fait des apports de digestat qui permettent d'importer du P et du K dans les systèmes via les déchets extérieurs à l'exploitation méthanisés. On peut donc s'attendre à une diminution des besoins en engrais P et K avec la méthanisation. Ces bilans sont cependant associés à des incertitudes du fait des exports réels de nutriments des CIVE encore peu documentés et de la disponibilité du P et du K du digestat.

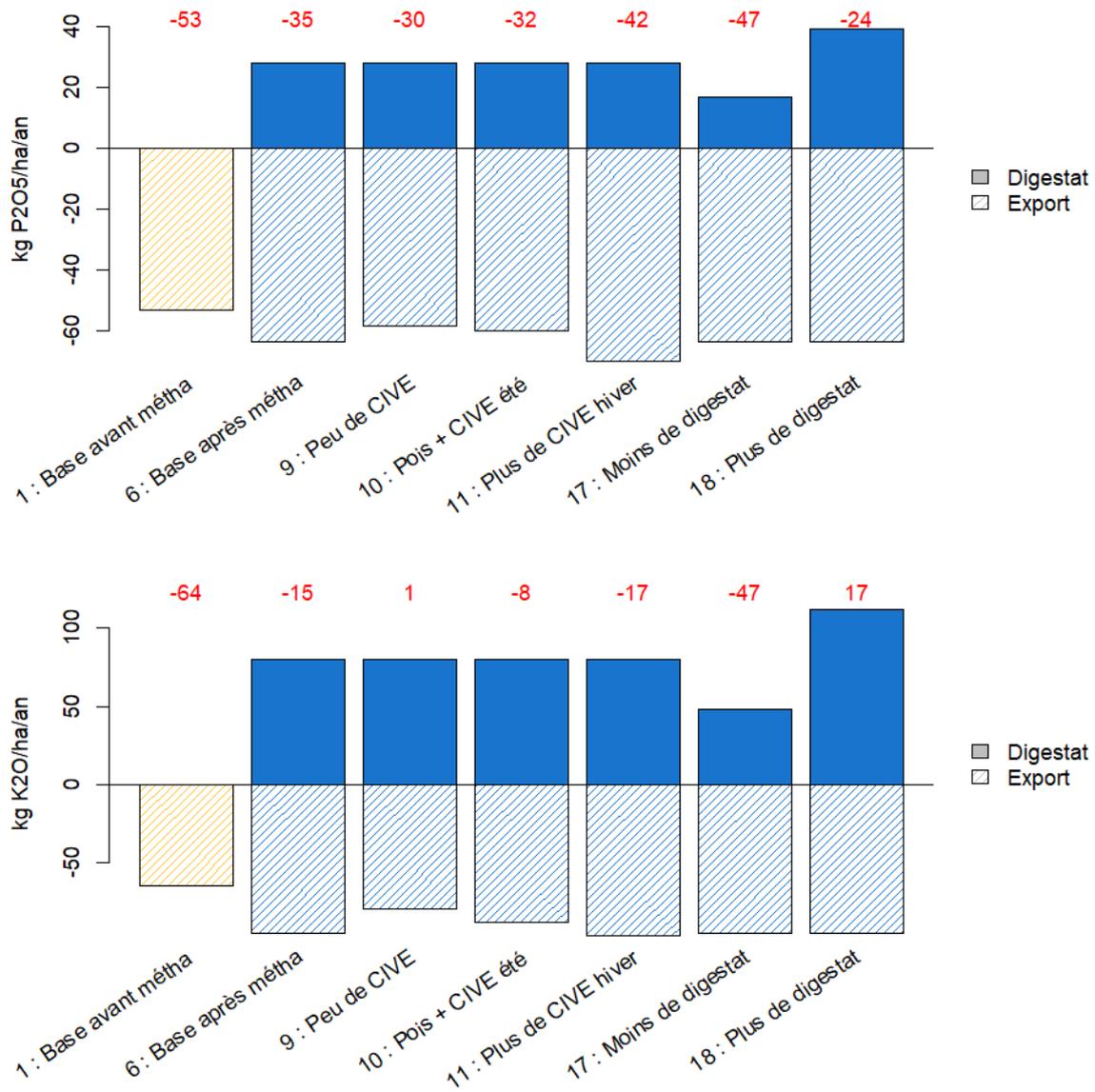


Figure 15 : Bilan P et K moyen annuel de scénarios avant et après méthanisation (le nombre rouge indique la valeur du bilan)

6.2.10 Drainage et recharge des nappes

L'introduction des CIVE va provoquer un prélèvement d'eau du sol plus important et ainsi réduire les quantités d'eau drainées vers les nappes. La réduction est estimée en moyenne à 20 mm/an avec le scénario de base après méthanisation, comparable à un scénario ACS avant méthanisation (Figure 16). Plus la proportion de CIVE est élevée, plus cette réduction du drainage l'est et vice-versa. L'effet des sécheresses estivales aurait un impact bien plus fort sur cette réduction du drainage.

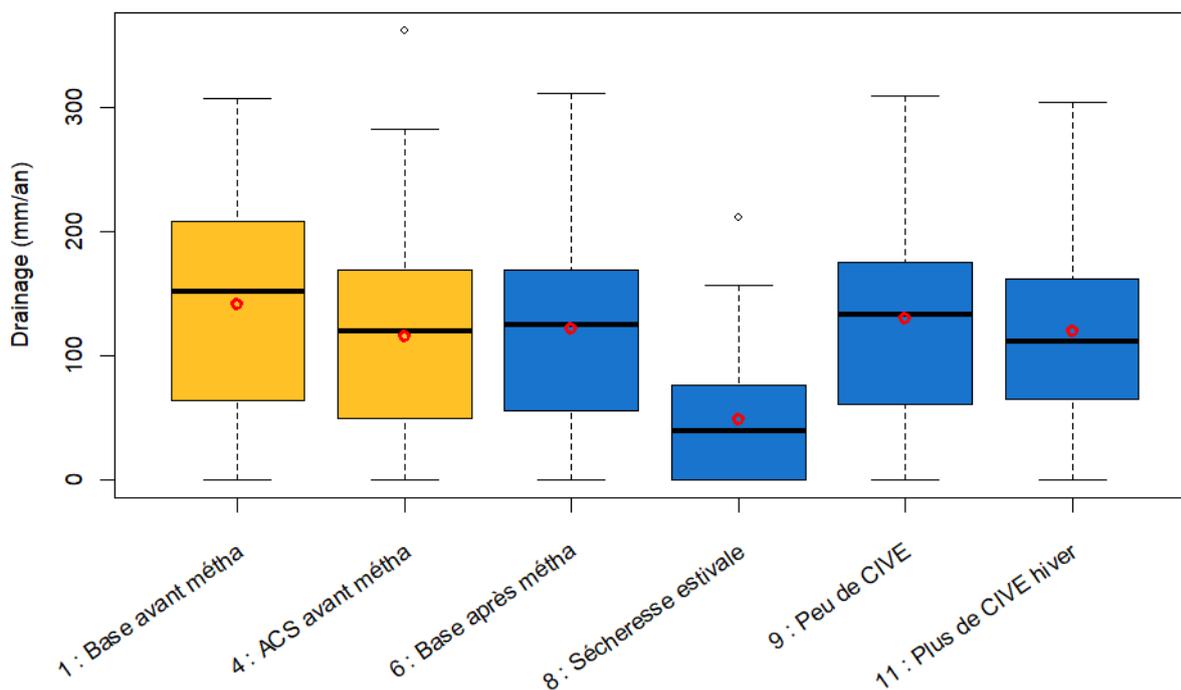


Figure 16 : Drainage à la base du sol pour différents scénarios avant et après méthanisation. Les boîtes à moustache représentent la variabilité du drainage annuel selon les cultures et les années climatiques, tandis que le point rouge représente la moyenne.

6.2.11 Pression phytosanitaire

Les scénarios avec méthanisation induisent tous une légère augmentation de l'IFT (totale ou herbicide), sauf le scénario avec CIVE bas intrant : de 5,75 à 6,08 par exemple pour les scénarios de base avant et après méthanisation (Figure 17). Cette augmentation est due aux traitements additionnels sur les CIVE qui ne sont pas compensés par la réduction des traitements sur les cultures principales (orge grain moins traitée que le blé tendre). L'IFT augmente donc avec la proportion de CIVE dans l'assolement. Le scénario de CIVE bas intrant (sans phyto) permettrait de diminuer l'IFT moyen de la rotation, du fait de la réduction des traitements sur les cultures principales.

Ces résultats sont directement dépendants des hypothèses retenues d'IFT par culture : un demi IFT de la culture grain correspondante pour les CIVE, IFT d'orge d'hiver grain inférieur à celui du blé tendre et à l'augmentation d'orge grain au détriment du blé tendre dans l'assolement. Un traitement plus important des CIVE (similaire aux cultures grain correspondantes) et un IFT d'orge d'hiver plus élevé augmenterait davantage les IFT. Enfin, les effets d'un salissement à long terme, ou à l'inverse d'une réduction de la pression adventice, dus aux changements de système de culture ne sont pas considérés, alors qu'ils pourraient induire une variation de la pression phytosanitaire également.

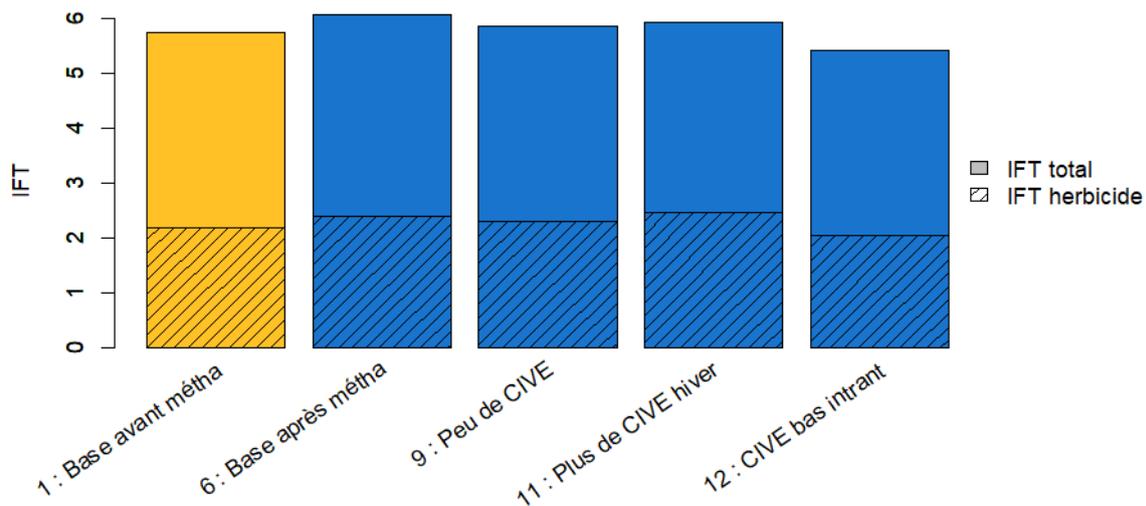


Figure 17 : Indice de Fréquence de Traitement (IFT) moyen à la rotation selon les scénarios avant et après méthanisation.

6.2.12 Lixiviation d'azote

La lixiviation d'azote sur sols limoneux reste faible quel que soit le scénario, du fait de la profondeur des sols, des lames drainantes limitées, d'un ajustement de la fertilisation et d'une bonne couverture des sols en général (Figure 18). Elle est en moyenne de 2 kg N/ha/an dans les scénarios de base avant et après méthanisation. Elle est augmentée que très légèrement (moins d'un kg N/ha/ha) avec des apports de digestat avec maïs CIVE ou sur CIPAN, un peu plus avec une fertilisation des CIVE fixe (5 kg N/ha/an). La non couverture des intercultures longues avant méthanisation augmente davantage et logiquement la lixiviation (6 kg N/ha/an). Malgré ces faibles pertes par lixiviation en moyenne, certaines années climatiques peuvent présenter des pertes plus importantes (conjonction d'hiver pluvieux et de reliquats azotés entrée hiver plus important).

Sur sols sableux plus superficiels, la lixiviation est logiquement plus importante, et globalement plus faible après méthanisation (12 kg N/ha/an après méthanisation en moyenne contre 14 kg N/ha/an avant méthanisation).

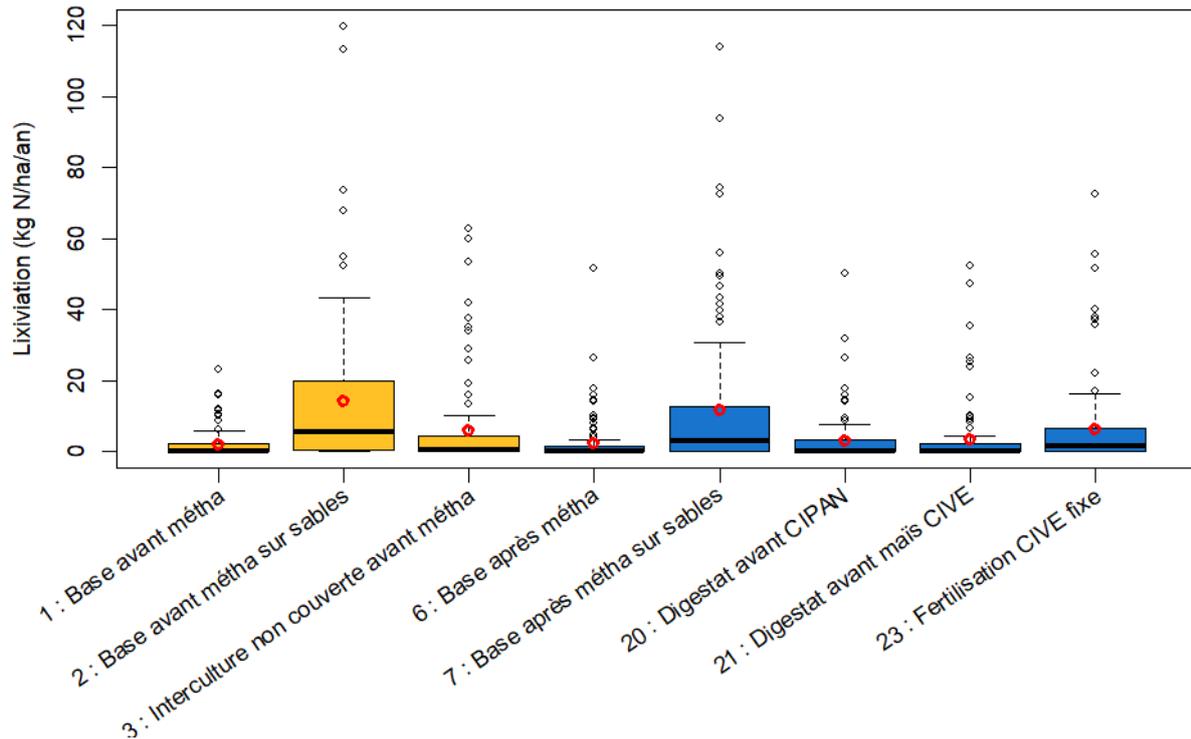


Figure 18 : Lixiviation d'azote par scénario. La boîte à moustache représente la variabilité selon les cultures et les années climatiques par scénario, tandis que le point rouge représente la moyenne.

6.2.13 Volatilisation ammoniacale

La méthanisation augmente la volatilisation ammoniacale moyenne annuelle du fait des épandages de digestat (19 et 22 kg N/ha/an dans les scénarios de base avant et après méthanisation, respectivement) (Figure 19). Cette augmentation de la volatilisation est due à la volatilisation associée aux apports de digestats (Figure 20). La volatilisation augmente ou diminue avec la fréquence d'épandage des digestats (scénarios 18 et 19). L'épandage de digestat avant maïs CIVE ou CIPAN (à comparer au scénario avec peu de CIVE) augmente globalement la volatilisation même avec enfouissement, du fait de conditions très favorables à la volatilisation à ces périodes de l'année. L'épandage de digestat en 1^{er} apport sur céréales en sortie d'hiver permet globalement de diminuer la volatilisation par rapport à un épandage en 2^e apport de 3 kg N/ha/an. La séparation de phase diminue légèrement la volatilisation (très faible volatilisation associée au digestat solide qui contient très peu d'azote ammoniacal, volatilisation du digestat liquide légèrement inférieure à celle du brut).

Enfin, il est à noter que la volatilisation ammoniacale au stockage des digestats n'est pas considérée ici alors qu'elle est une source d'émissions importantes (Moinard, 2021).

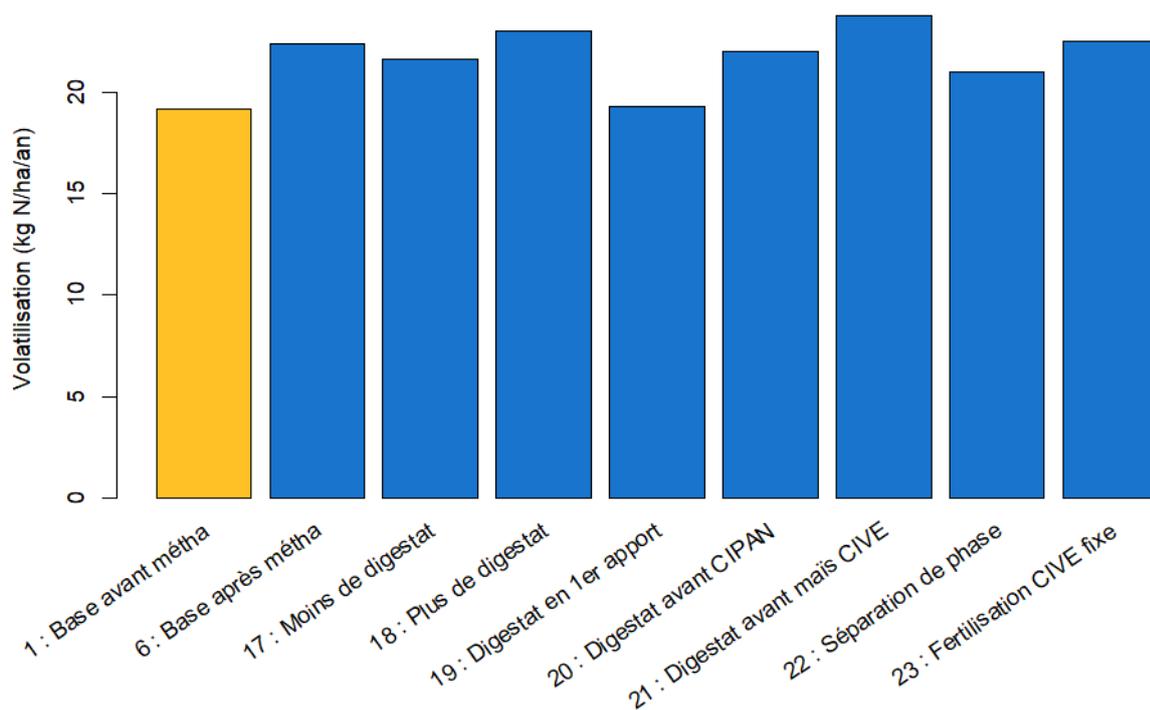


Figure 19 : Volatilisation ammoniacale moyenne annuelle par scénario

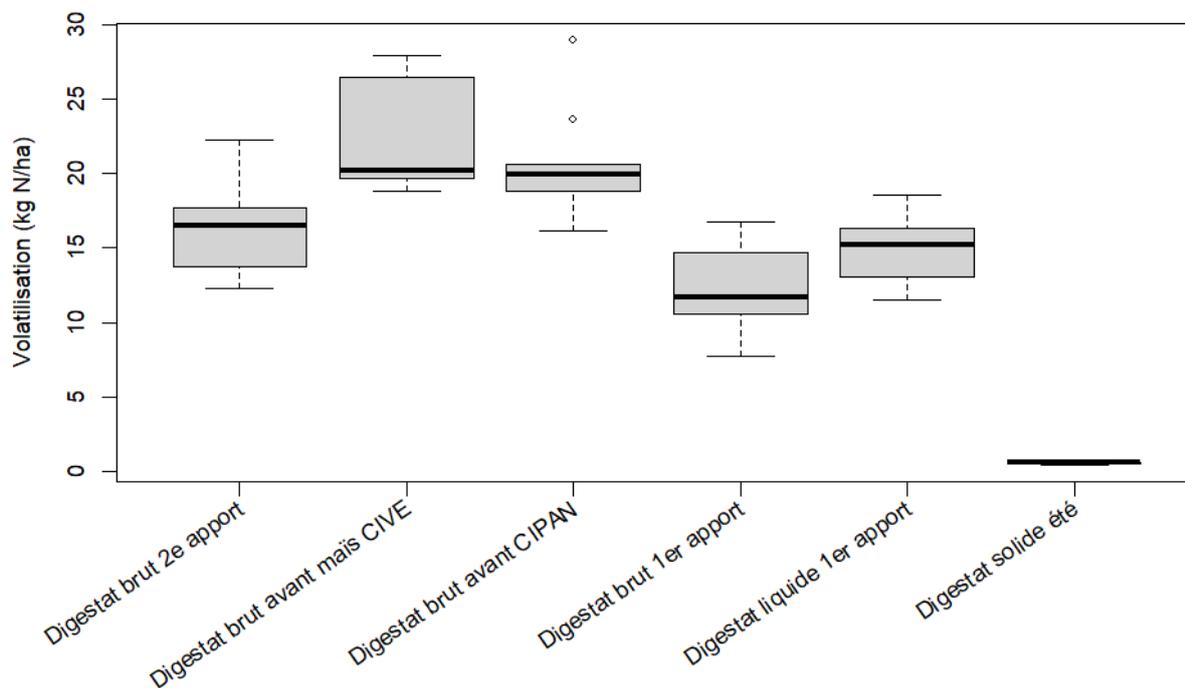


Figure 20 : Volatilisation suite à un apport de digestat brut (40 m³/ha) à différentes périodes de l'année, de digestat liquide (40 m³/ha) ou solide (10 t/ha). La boîte à moustache représente la variabilité selon les années climatiques.

6.2.14 Emissions de protoxyde d'azote

Les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) simulées par le modèle sont assez peu variables selon les scénarios. Au vu des incertitudes sur la simulation du N₂O et des très faibles écarts simulés, il ne sera pas possible de statuer sur un éventuel effet de la méthanisation sur ces émissions.

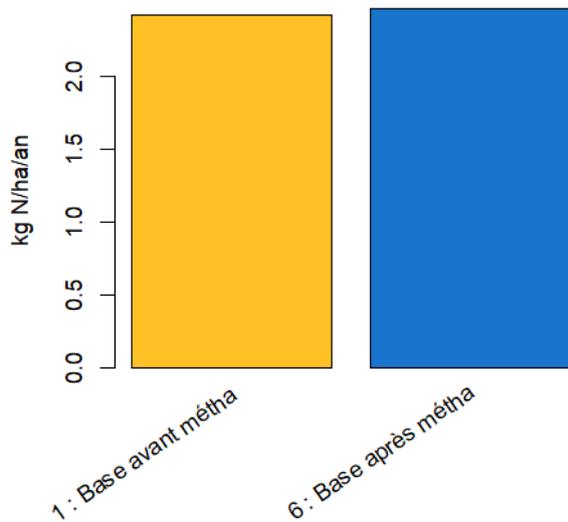


Figure 21 : Emissions de protoxyde d'azote moyenne avant et après méthanisation.

6.2.15 Bilan gaz à effet de serre à la parcelle

La méthanisation permet une nette réduction des émissions GES liées à la fabrication des engrais azotés, ainsi que celles liées à la fabrication des engrais PK (largement moins importantes par ailleurs) (Figure 22). La méthanisation permet également des émissions « négatives » liée aux stockage de carbone dans les sols. En contrepartie, on observe une augmentation des émissions liées au machinisme (épandage et ensilage notamment), ainsi que des émissions de N₂O indirectes (suite à l'augmentation de la volatilisation). Ces augmentations d'émissions n'annulent pas les réductions d'émissions précédentes, si bien que le bilan GES à la parcelle (par unité de surface) s'en trouve nettement amélioré (Tableau 10), passant de 1725 kg CO₂eq/ha/an avant méthanisation à 977 kg CO₂eq/ha/an après méthanisation. Cependant, en incluant les émissions au stockage du digestat, le bilan se trouve complètement inversé, avec une augmentation des émissions liée à la méthanisation. L'inclusion ou non de ces émissions au stockage dans un bilan GES à la parcelle est une question méthodologique difficile à trancher. On devrait alors également comptabiliser des émissions négatives liées à la production de biogaz. L'échelle de la parcelle n'est pas vraiment adaptée pour traiter ce genre de bilan GES avec une multifonctionnalité (production agricole et production d'énergie). Cette question sera traitée à l'échelle de l'exploitation (chapitre 7).

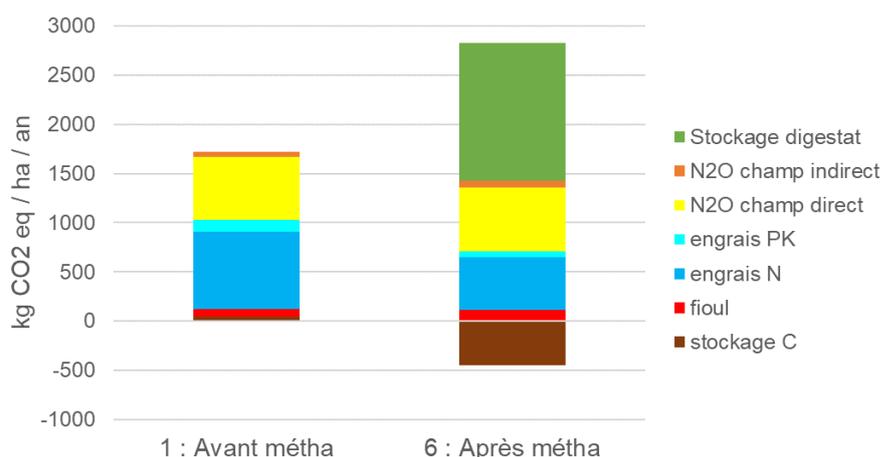


Figure 22 : Emissions de GES à la parcelle pour les scénarios de base avant et après méthanisation

Tableau 10 : Bilan GES à la parcelle (en kg CO₂eq/ha/an) pour les scénarios de base avant et après méthanisation, avec ou sans considération des émissions liées au stockage de digestat

	1 : Avant méthanisation	6 : après méthanisation
Sans émissions liées au stockage de digestat	1725	977
Avec émissions liées au stockage de digestat		2370

6.3 Synthèse à l'échelle parcelle

Le Tableau 11 présente une synthèse de l'évaluation des systèmes de culture avant et après méthanisation (scénarios de base) et indique des compléments et principaux points d'attention (en se basant notamment sur les scénarios alternatifs).

Il ressort un ensemble d'effets positifs : augmentation de la production totale de biomasse, augmentation du stockage de carbone dans les sols (plus d'entrées racinaires via les CIVE et digestats), économies d'engrais N, P et K. En contrepartie, la volatilisation ammoniacale augmente (qualité de l'air dégradée) et doit être maîtrisée en favorisant des périodes d'épandage moins sensibles. Une diminution de la recharge des nappes peut aussi être attendue, ainsi qu'une sollicitation accrue des réserves en eau dans le cas d'un recours à l'irrigation (non majoritaire pour le moment). Une baisse de la production de biomasse alimentaire est également possible du fait des cultures dédiées, mais aussi de l'impact des CIVE d'hiver sur les cultures suivantes. Les autres effets sont neutres ou entachés de trop d'incertitudes. Un point de vigilance important concerne l'usage des phytosanitaires : il a été considéré quasi-stable dans l'évaluation, mais des incertitudes importantes existent notamment sur les effets à long terme.

Une partie des principaux effets (positifs ou négatifs) croit avec les quantités de digestats épandues : plus d'économies d'engrais, plus de stockage de carbone, mais aussi plus de volatilisation. L'augmentation de la proportion de CIVE dans les assolements aura tendance à diminuer ces économies d'engrais, la recharge des nappes et la diversité des assolements et à augmenter la pression phytosanitaire, mais augmentera la production de biomasse et le stockage de carbone (plus d'entrées de carbone racinaire).

Malgré les nombreux effets considérés dans cette étude, des effets n'ont pas pu être évalués, comme l'effet sur la compaction du sol ou une évaluation plus approfondie sur la biologie du sol. En l'absence de mesures au champ réalisés dans l'étude, le manque de modèles opérationnels disponibles sur ces

aspects a été limitant. Il est également important de rappeler que tous les résultats exposés ici sont issus de résultats de modèle, qui bien qu'évalués dans de nombreuses conditions de systèmes de culture et de contexte pédoclimatiques, sont associés à une incertitude non négligeable. Les principaux résultats de modélisation vont cependant dans le sens de la littérature (paragraphe 3) et semblent donc robustes.

Enfin, le bilan GES à la parcelle est assez incertain pour des raisons méthodologiques (allocation des émissions du digestat, de la production de biogaz...). Il est plus pertinent de l'aborder à l'échelle de l'exploitation pour considérer la multifonctionnalité (production agricole et d'énergie).

Tableau 11 : Synthèse des effets des systèmes de culture associés à la méthanisation sans élevage, en se basant sur les différences entre scénario de base avant et après méthanisation

Critère	Evolution	Commentaires, points d'attention
Production de biomasse	↗	Augmentation globale de la production de biomasse. Potentiel très limité des cultures d'été (CIVE d'été ou post CIVE d'hiver) avec les sécheresses estivales Irrigation peut limiter les risques liés aux sécheresses estivales : opportunité à étudier selon des critères non considérés ici (ressource en eau disponible, etc.).
Production de biomasse non à destination de la méthanisation	↘	Diminution dans le cas d'une perte de rendement du maïs grain suivant CIVE d'hiver. Diminution supplémentaire si moindre productivité de l'orge d'hiver remplaçant le blé tendre avant CIVE d'été. Diminution avec cultures dédiées.
Diversité (familles cultivées, périodes d'implantation)	≈ à ↘	Attention à la simplification des assolements pouvant avoir des effets sur le salissement, les maladies, etc.
Couverture des sols	↗	Résultats similaires à un système en agriculture de conservation des sols
Stockage de carbone	↗	A la parcelle, le stockage augmente avec les quantités de digestats épandues et la fréquence des CIVE (plus forte entrée de carbone racinaire) Stockage reste limité en comparaison à des épandages réguliers de composts
Fertilité du sol	≈ à ↗	Légère amélioration possible, mais limitée du fait du stockage de carbone limité
Consommation d'engrais N à la rotation	↘	A la parcelle, les économies d'engrais augmentent avec les quantités de digestats épandues, diminuent avec la fréquence des CIVE. L'introduction du pois (en précédent de CIVE d'été) permet de diminuer davantage la consommation d'engrais. Pour les CIVE d'été, la minéralisation d'azote organique du sol peut fournir une bonne partie des besoins. Pour les CIVE d'hiver, un apport de digestat (40 m ³ /ha) peut fournir la majeure partie des besoins.
Bilan entrée-sorties PK	↗	A la parcelle, le bilan PK augmente avec les quantités de digestats épandues et diminue avec la proportion de CIVE.
Drainage / recharge des nappes	↘	Drainage diminue avec l'augmentation des CIVE (de façon similaire à un système en agriculture de conservation) Augmentation possible des prélèvements pour l'irrigation des CIVE ou cultures suivantes (non majoritaire pour le moment)
Pression phyto	≈ à ↗	Très dépendante des conduites des CIVE et des substitutions de cultures principales Effets sur le long terme (positif ou négatif sur le salissement, les maladies) non considérés.
Lixiviation d'azote	≈ à ↘	Les CIVE assurent le rôle des CIPAN.
Volatilisation ammoniacale	↗	Augmentation avec les apports de digestats quelles que soient les pratiques considérées (+ émissions au stockage) Eviter les apports d'été (sur maïs CIVE ou CIPAN), qu'il y ait enfouissement ou non.
Emissions de N ₂ O	≈	Forte incertitude mais apparente stabilité
Bilan GES à la parcelle	↘	Favorable si non considération des émissions au stockage de digestat. Question à traiter à l'échelle de l'exploitation

7 Résultats de modélisation à l'échelle ferme

7.1 Caractérisation du scénario de base (situation initiale)

La définition des caractéristiques du scénario de base étudié s'est appuyée sur les résultats de la phase d'analyse de la littérature scientifique et technique et de la phase d'enquête.

En particulier, les travaux d'enquête ont montré une assez grande homogénéité dans les systèmes de production agricole liés aux méthaniseurs en Ile-de-France : homogénéité des types de sol (limons des plateaux typiques), des productions végétales principales des exploitations concernées (grandes cultures et betteraves), des itinéraires techniques pour chaque culture (fertilisation, protection phytosanitaire) et des niveaux de rendement. On rappelle ici que l'objectif de la modélisation à l'échelle de la ferme est de capter les grands changements dans les systèmes de production induits par la méthanisation. Ainsi, un seul scénario de base a été modélisé, avec et sans méthaniseur, reprenant les caractéristiques moyennes des fermes et des méthaniseurs enquêtés (caractéristiques principales présentées dans le tableau ci-dessous).

Nous avons donc fait le choix de modéliser uniquement les cultures les plus représentées et les plus impactées par la méthanisation, selon les enquêtes et la littérature scientifique et technique (cultures dont les surfaces avant/après méthanisation varient, cultures recevant du digestat). Selon les enquêtes, la plupart des méthaniseurs d'Ile-de-France sont basés sur un ou des agriculteurs associés cultivant une surface totale autour de 700 à 900 hectares, c'est pourquoi une surface totale de 800 ha a été fixée pour le scénario de base. Les niveaux moyens de rendement des différentes cultures ont été fixés d'après les résultats des enquêtes puis confirmés avec les agriculteurs enquêtés. La quantité d'azote apportée par culture a été déterminée suivant les résultats des modélisations faites avec l'outil PROLEG (modélisation à la parcelle). En termes de stratégie de protection phytosanitaire, traduite dans le modèle par les IFT (Indices de Fréquence de Traitement) par culture, il a été décidé de prendre pour valeur la moyenne des 7^{èmes} déciles des IFT 2011 et 2014 pour la région Ile-de-France. L'objectif est que les IFT du système modélisé soient représentatifs des IFT des productions végétales d'Ile-de-France. Concernant les charges opérationnelles et les consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées aux itinéraires techniques, elles ont été calculées avec un calculateur développé en interne sur Excel®, basé sur les données de coûts des opérations culturales 2018 des matériels agricoles (APCA, 2018), les impacts énergie et effet de serre des intrants des analyses de cycle de vie d'Agribalyse (RESULTATS IACV - méthode ILCD 1.05 -février 2015) et sur les coefficients d'émission de GES et de NH₃ issus du guide GES'TIM+ (juin 2020).

Tableau 12 Paramètres techniques de l'exploitation modélisée dans PerfAgroP3

Paramètres techniques de l'exploitation	Caractérisation dans le modèle	
<i>Surface agricole cultivée</i>	800 ha	
<i>Cultures possibles et rendement aux normes</i>	Blé	9 t/ha
	Maïs grain	10 t/ha
	Escourgeon	9 t/ha
	Colza	3,2 t/ha
	Betterave sucrière	80 t/ha
<i>Engrais disponible</i>	Solution azotée	
<i>Besoins en azote</i>	Besoins par culture modélisés dans PROLEG	
<i>Irrigation dans le scénario de base</i>	Non	
<i>IFT par culture</i>	Moyenne 7 ^{ème} décile 2011-2014 région Ile-de-France	

Paramètres techniques de l'exploitation	Caractérisation dans le modèle
<i>Charges opérationnelles</i>	Coûts des opérations culturales 2018 des Matériels Agricoles (APCA, 2018)
<i>Impacts énergie et GES, émissions de NH₃</i>	Agribalyse (2015) et GES'TIM + (2020)

7.2 Caractérisation du méthaniseur

Les enquêtes ont montré que les tailles des méthaniseurs sans élevage d'Ile-de-France étaient assez variées et évoluaient dans le temps. Plusieurs installations ont en effet commencé à une production autour de 150 Nm³/h et ont acquis, après quelques années, de la capacité de production supplémentaire. Ainsi nous avons paramétré un méthaniseur de 150 Nm³/h dans les scénarios avec méthaniseur, avec les caractéristiques techniques suivants :

Tableau 13 Paramètres techniques du méthaniseur modélisé dans PerfAgroP3

Paramètres techniques du méthaniseur	Caractérisation dans le modèle
<i>Rendement du méthaniseur</i>	78 %
<i>% de biogaz torché</i>	5 %
<i>Pertes de biogaz (pb d'étanchéité)</i>	1,5 %
<i>Teneur en CH₄ du biogaz</i>	60 %
<i>Rendement épurateur + injecteur</i>	93,8 %
<i>Débit de l'injecteur</i>	150 m ³ CH ₄ /h
<i>Temps de fonctionnement de l'injecteur</i>	8234 heures/an
<i>Consommation d'électricité par l'ensemble digestion + épurateur + injecteur</i>	432 285 kWh/an

Les principales caractéristiques de coûts du méthaniseur sont tirées du document de l'ADEME, Enea Consulting, et APESA (2017) : Suivi technique, économique et environnemental d'installations de production et d'injection de biométhane dans les réseaux de gaz naturel – Rapport de synthèse des suivis. Nous avons considéré un niveau d'investissement de 30k€/ (Nm³/h), soit un investissement initial de 4,5 millions d'€. Sur 15 ans, l'amortissement est de 300 k€/an. Le prix de vente du biométhane de la situation de base avec méthaniseur a été calculé selon la méthode prévalant avant janvier 2021 (c'est-à-dire le tarif valable pour toutes les unités de méthanisation ayant contractualisé avant la publication des nouveaux tarifs le 24 novembre 2020). La plupart des scénarios avec méthaniseur reprennent ce tarif de 11,6 centimes/kWh, sauf un scénario qui prend le tarif calculé avec la méthode actuelle (soit 10,05 centimes/kWh, selon nos hypothèses techniques).

Tableau 14 Paramètres de coûts et prix du méthaniseur modélisé dans PerfAgroP3

Paramètres de coûts et prix du méthaniseur	Caractérisation dans le modèle
<i>Prix de vente du biométhane</i>	11,6 centimes/kWh
<i>Coût de fonctionnement hors main d'œuvre et approvisionnement (charges d'épuration, d'injection, de maintenance, autres)</i>	190 000 €/an
<i>Amortissement du méthaniseur</i>	300 000 €/an
<i>Main d'œuvre</i>	2 000 heures/an

7.3 Définition des scénarios alternatifs

En plus du scénario de base, un ensemble de scénarios alternatifs a été défini :

Tableau 15 Descriptif des scénarios testés avec PerfAgroP3

	Nom	Descriptif / principale caractéristique	Objectif
1	Sit init	Scénario de base sans méthaniseur	Situation de référence
2	Métha 1a	Scénario de base avec méthaniseur Prix de vente du biogaz : 11,6 centimes d'€/kWh CIVE possibles : orge CIVE (rendement 10 t MS/ha) suivie de maïs grain (rendement 8 t/ha), ou maïs CIVE (rendement 6 t MS/ha) précédé d'orge grain (rendement 9 t/ha). Conduites intensives. Pas de cultures dédiées. Substrats extérieurs limités (1500 t de graisses, 2000 t d'issues de céréales, 1500 t MS de pulpes de betteraves).	Situation de référence avec méthaniseur
3	Métha 1b	Métha 1a + Prix de vente du biogaz : 10,05 centimes d'€/kWh.	Etude de l'impact du prix sur la durabilité du système
4	Métha 1c	Métha 1a + culture dédiée possible (maïs ensilage après couvert, rendement 14 t MS/ha)	Etude de l'intérêt de la culture dédiée.
5	Métha 1d	Métha 1a + culture dédiée possible (orge CIVE, rendement 10 t MS/ha, suivie de maïs ensilage culture dédiée, rendement 12 t MS/ha).	Etude de l'intérêt de la culture dédiée.
6	Métha 2a	Métha 1a + CIVE d'hiver et d'été bas intrants possible (protection phytosanitaire divisée par 2, apports en azote optimisés suivant les résultats de PROLEG), à niveau de rendement équivalent aux CIVE conduites de façon intensive (10 t MS/ha) (attention ces hypothèses sont différentes de celles du scénario bas intrant testé avec Proleg).	Etude de l'intérêt des CIVE bas intrants.
7	Métha 2b	Métha 1a + CIVE bas intrants, rendements de l'orge CIVE à 8 t MS/ha et rendements du maïs grain suivant à 8,5 t/ha	Etude de l'intérêt de CIVE d'hiver bas intrant avec date de récolte plus précoce.
8	Métha 3	Métha 1a + meilleure disponibilité de substrats extérieurs (2000 t graisses, 2000 t d'issues de céréales, 1500 t de pulpes, 500 t de pommes de terre déclassées, 3000 t de lactosérum en poudre et lactosérum concentré, 2000 t de boues d'industries agro-alimentaires).	Etude de l'intérêt de la diversification de l'approvisionnement avec des substrats extérieurs.
9	Métha 4	Métha 3 + CIVE bas intrants à niveau de rendement équivalent aux CIVE « intensives » (orge CIVE à 10 t MS/ha suivi de maïs grain à 8 t/ha), limité à 2800 t/an.	Etude de l'intérêt combiné de la diversification de l'approvisionnement avec des substrats extérieurs et des CIVE bas intrants.
10	Métha 5	Métha 1a + orge CIVE suivi de maïs grain limité à 225 ha + irrigation possible du maïs cultivé en CIVE derrière de l'escourgeon grain. Rendement du maïs CIVE irrigué : 7,5 t/ha.	Etude de l'intérêt de l'irrigation de maïs CIVE.

Chacun des scénarios a été paramétré dans PerfAgroP3. L'outil a ensuite calculé, pour chacun des scénarios, la combinaison d'activités et leur niveau permettant de maximiser la « fonction objectif » choisie pour cette étude, c'est-à-dire la marge économique (marge PerfAgroP3) du système global. La marge économique a été choisie comme fonction objectif pour se rapprocher du mode de fonctionnement d'une exploitation classique, où l'agriculteur met en général en place des solutions pour maximiser sa marge en premier lieu. Le système global dans cette étude est constitué par la surface cultivée de 800 hectares et le méthaniseur, le cas échéant (i.e. tous les cas sauf Sit Init, où il n'y a pas de méthaniseur). Chacune des solutions calculées est caractérisée par un grand nombre de paramètres de sortie. A noter que chacune des solutions calculées est une solution optimisée. Elle ne retranscrit pas forcément complètement la réalité du terrain (soit parce que l'agriculteur sur le terrain n'optimise pas parfaitement car il n'a pas toutes les informations en main pour le faire, soit parce qu'il a des contraintes qui ne sont pas ou pas bien prises en compte dans le modèle). Nous avons sélectionné les principaux paramètres de sortie et les avons présentés dans un tableau synthétique pour comparer chacun des scénarios au scénario de base sans méthanisation.

7.4 Résultats

7.4.1 Etude de l'impact de la méthanisation et du prix de vente du biogaz (métha 1a et 1b)

Tableau 16 Indicateurs de sortie de PerfAgroP3 pour les scénarios Sit Init, Métha 1a et Métha 1b

	Sit init	Métha 1a	Variation /sit init %	Métha 1b	Variation /sit init %
Marge PerfAgro (€)	627831	592716	-6%	455313	-27%
Bilan énergétique en GJ/an (production d'énergie – consommations d'énergie fossile)	-11373	19261		21301	
Economies d'émission de GES en tonnes éq. CO ₂ liées à la substitution de gaz de ville par du biogaz		2012		2012	
Bilan GES en tonnes éq. CO ₂ (émissions de GES – économies d'émissions)	2000	1258	-37%	1258	-37%
Nombre de personnes nourries (Calories)	15040	16045	7%	16045	7%
Nombre de personnes	21218	15064	-29%	15064	-29%

<i>nourries (Protéines)</i>					
<i>Main d'œuvre totale (heures)</i>	3358	6224	85%	6224	85%
<i>IFT total</i>	5,47	4,38	-20%	4,38	-20%
<i>Epanrages de solution N39 en kg N/ha</i>	164	130	-21%	130	-21%
<i>Epanrages de digestat en kg N/ha</i>		101		101	
<i>Pertes de N en kg N-NH₃ / kg N apporté</i>	0,10	0,14	46%	0,14	46%
<i>Consommations de carburant en litres/ha</i>	76	128	67%	128	1
<i>Part de CIVE dans l'assolement</i>	0%	41%		41%	
<i>Part de CIVE dans la ration du méthaniseur</i>	0%	92%		92%	

Dans une situation où des substrats extérieurs sont disponibles en quantités limitées, où l'exploitation ne produit pas de culture dédiée, et où par conséquent l'alimentation du méthaniseur se fait essentiellement avec des cultures intermédiaires à vocation énergétique conduites de façon relativement intensive (92% de CIVE dans la ration du méthaniseur selon le modèle, fertilisation et protection phytosanitaire des CIVE), le système global, constitué de 800 hectares cultivés et du méthaniseur, dégage une marge moins élevée qu'en situation initiale. Cette marge est censée couvrir les frais financiers, taxes, amortissements autres que le méthaniseur, etc. Elle est d'autant moins élevée que le tarif de rachat du biogaz est bas.

Pour alimenter le méthaniseur, l'exploitation produit une grande quantité d'orge en CIVE d'hiver (sur 41% de la surface), suivie de maïs cultivé en grain. Selon les hypothèses de rendement, de contraintes de rotation assez flexibles, il n'y a pas d'intérêt à produire de la CIVE d'été, par rapport à la CIVE d'hiver, et la solution calculée n'en intègre donc pas dans l'assolement.

Le système global résultant a un bilan énergétique positif, la production d'énergie étant à peu près 3 fois supérieure aux consommations d'énergie globales du système. Le système émet davantage de gaz à effet de serre qu'en situation initiale, mais les émissions supplémentaires sont largement compensées par les économies d'émission liées à la substitution du gaz fossile par du biogaz.

Le nombre de personnes nourries par les calories produites par l'exploitation est en légère hausse, car l'assolement intègre davantage de maïs, avec une production importante de calories par hectare. En revanche le maïs étant plus pauvre en protéines que le blé, qui disparaît de l'assolement, le nombre de personnes nourries par les protéines chute.

La main d'œuvre (temps de travail sur l'exploitation) augmente principalement à cause du travail supplémentaire engagé sur le méthaniseur, y compris manutention des intrants, mais également à cause des travaux culturels supplémentaires (culture et récolte des CIVE).

L'IFT total diminue fortement, lié à la disparition du blé et du colza, à IFT élevés, de l'assolement, et leur remplacement par de l'orge et du maïs. La quantité d'engrais minéral consommé diminue considérablement dans le système, substitué par de l'azote organique provenant du digestat. La quantité globale d'azote épandu par hectare augmente fortement, liée à l'augmentation de la biomasse cultivée par hectare, et les quantités d'azote perdues sous forme d'ammoniac également, lié à l'augmentation de la fertilisation à l'hectare et la volatilité importante de l'azote du digestat. Les consommations de carburant par hectare augmentent, lié à l'augmentation du nombre d'opérations culturales avec la culture de CIVE.

7.4.2 Etude de l'intérêt de la culture dédiée (métha 1c et métha 1d)

Tableau 17 Indicateurs de sortie de PerfAgroP3 pour les scénarios Sit Init, Métha 1c et Métha 1d

	Sit init	Métha 1c	Variation /sit init %	Métha 1d	Variation /sit init %
<i>Marge PerfAgro (€)</i>	627831	607199	-3%	607569	-3%
<i>Bilan énergétique en GJ/an (production d'énergie – consommations d'énergie fossile)</i>	-11373	22573		22620	
<i>Economies d'émission de GES en tonnes éq. CO₂ liées à la substitution de gaz de ville par du biogaz</i>		2078		2078	
<i>Bilan GES en tonnes éq. CO₂ (émissions de GES – économies d'émissions)</i>	2000	1163	-42%	1194	-40%
<i>Nombre de personnes nourries (Calories)</i>	15040	15558	3%	15597	4%
<i>Nombre de personnes nourries (Protéines)</i>	21218	14607	-31%	14643	-31%
<i>Main d'œuvre totale (heures)</i>	3358	6169	84%	6172	84%
<i>IFT total</i>	5,47	4,32	-21%	4,32	-21%
<i>Epandages de solution N39 en kg N/ha</i>	164	127	-23%	127	-23%

<i>Epanchages de digestat en kg N/ha</i>		101		101	
<i>Pertes de N en kg N-NH₃ / kg N apporté</i>	0,10	0,14	46%	0,14	46%
<i>Consommations de carburant en litres/ha</i>	76	127	1	125	64%
<i>Part de CIVE dans l'assolement</i>	0%	39%		39%	
<i>Part de CIVE dans la ration du méthaniseur</i>	0%	87%		92%	

Dans un contexte de faible disponibilité d'intrants extérieurs, l'intégration d'un peu de cultures dédiées (soit du maïs ensilage semé au mois d'avril après un couvert, ou du maïs ensilage semé au mois de mai après une orge cultivée en CIVE) permet de réduire la différence de marge par rapport à la situation initiale, comparée à un scénario basé uniquement sur des CIVE. Cela s'explique notamment par un coût de production de la culture dédiée un peu moins important que celle de la CIVE, et une meilleure rentabilité de l'hectare cultivé avec une culture dédiée seule, ou une CIVE suivie d'une culture dédiée, par rapport à l'hectare cultivé avec une CIVE et une culture alimentaire. Ceci dit, compte tenu des contraintes de rotation et de la rentabilité comparée du maïs ensilage par rapport au maïs grain, le modèle n'intègre le maïs qu'à hauteur de 5% dans la ration du méthaniseur. Autrement dit, il est plus intéressant économiquement pour le système, dans le contexte de l'étude (notamment contexte de prix des différents produits de l'exploitation), de consacrer un maximum de surfaces à produire du maïs grain alimentaire, que de produire un maximum de maïs pour le méthaniseur.

7.4.3 Etude de l'intérêt des CIVE bas intrants (métha 2a et métha 2b)

Tableau 18 Indicateurs de sortie de PerfAgroP3 pour les scénarios Sit Init, Métha 2a et Métha 2b

	Sit init	Métha 2a	Variation /sit init %	Métha 2b	Variation /sit init %
<i>Marge PerfAgro (€)</i>	627831	623361	-1%	593746	-5%
<i>Bilan énergétique en GJ/an (production d'énergie – consommations d'énergie fossile)</i>	-11373	22397		21584	
<i>Economies d'émission de GES en tonnes éq. CO₂ liées à la substitution de gaz de ville par du biogaz</i>		2012		2012	

<i>Bilan GES en tonnes éq. CO₂ (émissions de GES – économies d'émissions)</i>	2000	1106	-45%	1240	-38%
<i>Nombre de personnes nourries (Calories)</i>	15040	15420	3%	15430	3%
<i>Nombre de personnes nourries (Protéines)</i>	21218	18469	-13%	17492	-18%
<i>Main d'œuvre totale (heures)</i>	3358	5924	76%	6244	86%
<i>IFT total</i>	5,47	4,51	-18%	4,66	-15%
<i>Epanrages de solution N39 en kg N/ha</i>	164	116	-29%	128	-22%
<i>Epanrages de digestat en kg N/ha</i>		101		101	
<i>Pertes de N en kg N-NH₃ / kg N apporté</i>	0,10	0,14	49%	0,14	46%
<i>Consommations de carburant en litres/ha</i>	76	116	52%	122	60%
<i>Part de CIVE dans l'assolement</i>	0%	41%		47%	
<i>Part de CIVE dans la ration du méthaniseur</i>	0%	92%		92%	

Dès lors que la possibilité est offerte de faire des CIVE bas intrants à rendement équivalent à une CIVE en conduite « intensive », le modèle intègre de l'orge CIVE bas intrant, suivie de maïs grain, dans l'assolement, en surface égale à l'orge CIVE « intensive » de la situation métha 1a (situation avec méthaniseur de référence). La marge économique est légèrement améliorée et atteint presque la marge économique de la situation initiale. Les consommations d'énergie et les émissions de GES sont réduites par rapport à métha 1a. En revanche, par rapport à la situation métha 1a, l'IFT augmente légèrement et le nombre de personnes nourries par les protéines augmente, du fait du retour du blé dans l'assolement.

7.4.4 Etude de l'intérêt de la diversification de l'approvisionnement du méthaniseur (métha 3 et métha 4)

Tableau 19 Indicateurs de sortie de PerfAgroP3 pour les scénarios Sit Init, Métha 3 et Métha 4

Sit init	Métha 3	Variation /sit init %	Métha 4	Variation /sit init %
----------	---------	-----------------------	---------	-----------------------

<i>Marge PerfAgro (€)</i>	627831	794069	26%	768466	22%
<i>Bilan énergétique en GJ/an (production d'énergie – consommations d'énergie fossile)</i>	-11373	23705		20947	
<i>Economies d'émission de GES en tonnes éq. CO₂ liées à la substitution de gaz de ville par du biogaz</i>		1905		1763	
<i>Bilan GES en tonnes éq. CO₂ (émissions de GES – économies d'émissions)</i>	2000	754	-62%	704	-64%
<i>Nombre de personnes nourries (Calories)</i>	15040	16800	12%	17035	13%
<i>Nombre de personnes nourries (Protéines)</i>	21218	17009	-20%	18264	-14%
<i>Main d'œuvre totale (heures)</i>	3358	5484	63%	5087	51%
<i>IFT total</i>	5,47	4,15	-24%	4,02	-27%
<i>Epandages de solution N39 en kg N/ha</i>	164	99	-40%	82	-50%
<i>Epandages de digestat en kg N/ha</i>		104		104	
<i>Pertes de N en kg N-NH₃ / kg N apporté</i>	0,10	0,15	53%	0,15	58%
<i>Consommations de carburant en litres/ha</i>	76	105	38%	94	23%
<i>Part de CIVE dans l'assolement</i>	0%	17%		7%	

<i>Part de CIVE dans la ration du méthaniseur</i>	0%	47%		20%	
---	----	-----	--	-----	--

Dans ces scénarios, l'augmentation conséquente de la disponibilité de substrats de méthanisation extérieurs, à caractéristiques techniques (taux de MS, rapport C/N, pouvoir méthanogène) variables et à bas coût, permet au système d'améliorer de façon conséquente sa marge économique, tout en baissant très significativement la part de CIVE dans l'assolement et dans la ration du méthaniseur. Le scénario métha 4 combine orge CIVE bas intrants et substrats extérieurs, pour une part de CIVE dans la ration autour de 20% (ce qui se rapproche de modèles enquêtés sur le terrain). Du fait de consommations d'énergie et d'émissions de GES faibles imputées à la production des substrats extérieurs (la plupart sont des déchets d'autres filières, et ne sont par conséquent affectés que de l'impact lié au transport jusqu'à l'exploitation), le bilan GES est nettement amélioré. L'IFT est également abaissé. Les pertes d'azote sous forme d'ammoniac sont toujours très conséquentes, dû à la volatilisation importante de l'azote ammoniacal du digestat.

7.4.5 Etude de l'intérêt de l'irrigation d'une CIVE d'été (métha 5)

Tableau 20 Indicateurs de sortie de PerfAgroP3 pour les scénarios Sit Init et Métha 5

	Sit init	Métha 5	Variation /sit init %
<i>Marge PerfAgro (€)</i>	627831	516489	-18%
<i>Bilan énergétique en GJ/an (production d'énergie – consommations d'énergie fossile)</i>	-11373	20417	
<i>Economies d'émission de GES en tonnes éq. CO₂ liées à la substitution de gaz de ville par du biogaz</i>		1983	
<i>Bilan GES en tonnes éq. CO₂ (émissions de GES – économies d'émissions)</i>	2000	1341	-33%
<i>Nombre de personnes nourries (Calories)</i>	15040	15840	5%
<i>Nombre de personnes nourries (Protéines)</i>	21218	15752	-26%

	Sit init	Méthas	Variation /sit init %
Main d'œuvre totale (heures)	3358	6758	101%
IFT total	5,47	5	-13%
Epanchages de solution N39 en kg N/ha	164	142	-14%
Epanchages de digestat en kg N/ha		102	
Pertes de N en kg N-NH ₃ / kg N apporté	0,10	0,14	44%
Consommations de carburant en litres/ha	76	123	62%
Part de CIVE dans l'assolement	0%	47%	
Part de CIVE dans la ration du méthaniseur	0%	91%	

Dans ce scénario, l'insertion de maïs CIVE irrigué dans la rotation n'est rendue possible que si l'on bloque la surface en orge CIVE (bloqué ici à 225 ha maximum). Compte tenu des hypothèses de rendement, le maïs CIVE irrigué est alors intégré dans l'assolement, ce qui signifie qu'il est plus intéressant économiquement que le maïs CIVE non irrigué, dans le cas où la quantité d'orge CIVE est contrainte (par contrainte de rotation par exemple, ou pour des problématiques agronomiques).

7.5 Conclusions de la modélisation échelle système

La modélisation à l'échelle du système global (800 hectares cultivés + méthaniseur) éclaire sur plusieurs aspects :

- D'une part la méthanisation agricole sans élevage, selon nos hypothèses, est toujours intéressante sur le plan du bilan énergétique et des émissions de gaz à effet de serre et est compatible avec une réduction de la pression phytosanitaire (même dans le cas de conduites intensives), du fait de la modification des assolements et de l'augmentation de la part de cultures à plus faible IFT, et dans le cas d'assolement optimisés. Le recours à l'azote de synthèse baisse, du fait de l'apport de digestat. En revanche les pertes azotées (volatilisation de l'ammoniac) augmentent fortement, lié à la forte teneur en azote ammoniacal du digestat.
- De façon assez peu intuitive, même sans culture dédiée, l'impact n'est pas neutre sur le potentiel nourricier. En effet les assolements sont impactés, et par conséquent la production de calories et de protéines. En l'occurrence, le scénario avec méthanisation de référence montre une baisse significative des surfaces en blé, d'où une diminution de la production de protéines.
- En revanche, sur le plan économique, la durabilité de la méthanisation agricole sans élevage est considérablement améliorée par la possibilité d'intégrer des substrats de méthanisation extérieurs à caractéristiques techniques variables et à bas coût. Cette possibilité dépend d'une part de l'existence de tels substrats et de l'existence ou non de filières de valorisation concurrentes qui peuvent éventuellement produire des tensions plus ou moins importantes et

faire baisser ou augmenter les coûts, et donc augmenter ou baisser l'intérêt pour la méthanisation. Dans le cas de l'existence de déchets méthanisables disponibles à bas coût, c'est non seulement le bilan économique mais aussi le bilan environnemental global qui peut être amélioré, compte tenu d'impacts énergie et GES assez voire très bas imputés aux substrats considérés comme déchets. Ceci dit, c'est le résultat d'une convention de calcul. Il conviendrait d'étudier les impacts énergie et GES à une échelle beaucoup plus large (territoriale) pour prendre en compte les filières de valorisation/traitement alternatives de ces déchets.

- La production de CIVE bas intrant a un impact non négligeable sur les indicateurs économiques et environnementaux. Toutefois, dans le cadre d'assolement optimisés, l'introduction de CIVE bas intrant ne provoque pas nécessairement une baisse de la pression phytosanitaire par rapport à des CIVE conduites de façon plus intensive. Ceci étant, les niveaux de rendement fixés pour les CIVE bas intrants sont plus optimistes que les résultats du modèle à la parcelle (Proleg). En outre, ni PerfAgroP3 ni Proleg ne permettent de prendre en compte l'impact sur le rendement des cultures suivantes de l'augmentation éventuelle de pression des adventices ou des ravageurs. In fine, on peut dire que si vraiment il est possible de cultiver des CIVE bas intrant avec un niveau de rendement maintenu, ce qui doit être vérifié par des essais agronomiques, alors cela peut apporter des gains significatifs en termes de marge et d'impacts environnementaux.
- Selon nos hypothèses, l'irrigation du maïs CIVE a un sens économique si l'approvisionnement en CIVE d'hiver produits sur la ferme et en substrats méthanisables extérieurs est contraint en quantité. Selon nos hypothèses de rendement, l'irrigation du maïs CIVE est plus intéressante économiquement que la production de maïs CIVE non irrigué, compte tenu des aléas importants de rendements du maïs sec. En revanche, nos outils de modélisation ne permettent pas de juger de l'impact de l'irrigation sur les ressources en eau.
- Toutes les simulations donnent des résultats de calcul d'optimisation, ce qui signifie que ces solutions ne reflètent pas le réel mais la meilleure combinaison possible de composantes du réel, selon les hypothèses et contraintes définies. Les solutions calculées ne se retrouveront donc pas obligatoirement telles quelles sur le terrain, car les agriculteurs ont des contraintes que le modèle ne sait pas toujours bien capter, ou bien n'ont pas toutes les informations pour optimiser parfaitement le système.

8 Elaboration de préconisations de suivi et de recommandations d'usage

En s'appuyant sur les résultats des phases précédentes de l'étude et après concertation avec les différents acteurs impliqués, un guide de 24 pages a été produit avec des préconisations de suivi et de recommandations d'usage sur :

- la stratégie d'alimentation du méthaniseur : recommandations de pratiques et préconisations de recherches complémentaires sur la proportion de CIVE d'été, les espèces cultivées comme CIVE, le choix des cultures précédentes et suivantes et la part des CIVE par rapport aux autres intrants dans la ration du méthaniseur.
- La conduite des CIVE : recommandations de pratiques et préconisations de recherches complémentaires sur la fertilisation des CIVE, la protection phytosanitaire des CIVE, le semis et la récolte, l'irrigation des CIVE d'été et des cultures suivant CIVE d'hiver.
- La gestion du digestat de méthanisation : recommandations de pratiques et préconisations de recherches complémentaires sur la prise en compte de la composition physico-chimique et la minéralisation du digestat, sur le stockage du digestat, la séparation de phase, le matériel d'épandage, la période d'épandage et la dose épandue.

Enfin le guide présente une liste de projets en cours ou à venir qui visent à répondre à une partie des questions soulevées par le guide.

9 Conclusion générale

L'étude des impacts agronomiques et environnementaux de la méthanisation agricole sans élevage a été menée sur une durée d'un an environ à partir d'octobre 2020, dans le contexte particulier de la région Ile-de-France. Elle s'est appuyée sur un état des lieux des connaissances scientifiques et techniques sur la méthanisation agricole sans élevage, sur des enquêtes de terrain auprès d'agriculteurs méthaniseurs franciliens, sur des analyses de digestats prélevés dans les 11 méthaniseurs agricoles sans élevage d'Ile-de-France en fonctionnement au moment de l'enquête et sur de la modélisation d'impacts agronomiques, environnementaux, techniques et économiques, à l'échelle de la parcelle et à l'échelle du système global (surface cultivée + méthaniseur).

A ce jour, l'étude de la littérature scientifique et technique sur les impacts agronomiques et environnementaux des systèmes de culture en lien avec de la méthanisation agricole sans élevage a mis en évidence plusieurs impacts plutôt positifs (production de biomasse, stockage de carbone, réduction de la lixiviation de nitrates), plusieurs impacts plutôt négatifs (volatilisation ammoniacale, tassement du sol, diminution des ressources en eau), et de nombreuses incertitudes sur les impacts agronomiques comme environnementaux.

L'enquête menée auprès de 22 agriculteurs impliqués dans les 11 méthaniseurs agricoles sans élevage en fonctionnement au premier trimestre 2021 a permis de faire un état des lieux détaillé des pratiques agricoles concernant la conduite des systèmes de culture en lien avec la méthanisation agricole et l'épandage de digestat et de recueillir des informations utiles sur le fonctionnement et l'approvisionnement du méthaniseur. C'est la première fois que de telles informations ont été recueillies, et elles donnent un éclairage nouveau et absolument crucial sur la réalité du terrain et sur les connaissances et références qui manquent aujourd'hui aux agriculteurs concernés. A l'occasion de ces enquêtes, des prélèvements de digestat de méthaniseur agricole sans élevage ont été effectués et ont permis de réaliser des analyses de propriétés physico-chimiques et de minéralisation du carbone et de l'azote. Ces informations seront très utiles aux agriculteurs, pour pouvoir tenir compte des spécificités des digestats dans leur stratégie de fertilisation, et notamment pour le calcul de la dose à apporter. Pour un grand nombre de caractéristiques, les digestats brut et liquide se rapprochent d'un lisier porcin et les digestats solides semblent se rapprocher d'un fumier bovin, mais la faible taille des échantillons et la relative variabilité de certaines caractéristiques (notamment azote total) encourage fortement à réaliser des analyses de digestat au plus près de la période d'épandage pour piloter au mieux les apports.

L'ensemble des données collectées lors de l'étude ont permis de concevoir des scénarios et de les tester par modélisation à l'échelle de la parcelle (avec l'outil Proleg) et du système global (avec l'outil PerfAgroP3). Ces outils ont permis d'évaluer les impacts agronomiques et environnementaux des systèmes de culture et plus globalement de la méthanisation sur le système global, à travers le calcul d'indicateurs d'impact.

A l'échelle de la parcelle, les résultats de simulation permettent de confirmer et préciser dans le contexte spécifique des méthaniseurs agricoles sans élevage d'Ile-de-France certains impacts déjà mis en évidence dans la littérature : des impacts plutôt positifs comme la production accrue de biomasse et le stockage de carbone ; des impacts plutôt négatifs comme la volatilisation d'ammoniac et la pression sur les ressources en eau. De nombreux autres impacts sont soit neutres soit très incertains et confirment la nécessité de poursuivre des recherches, notamment des essais agronomiques sur la conduite de CIVE ou l'épandage de digestat.

A l'échelle du système global, les résultats de simulation permettent de donner une estimation de l'effet de la méthanisation agricole sans élevage sur les bilans énergie et GES de l'exploitation et sur

l'IFT global. A cette échelle, même si la culture de CIVE peut impliquer une consommation accrue d'azote et de produits de protection à la parcelle, selon l'intensivité du système de production, le bilan énergétique global est quant à lui largement positif, les émissions de GES globales diminuent de façon très sensible, et l'IFT global diminue avec les modifications de l'assolement. Ceci étant, l'analyse de l'effet à un niveau plus territorial, englobant les impacts sur les filières de valorisation concurrentes des substrats extérieurs, serait nécessaire pour compléter l'approche. Par ailleurs, la durabilité économique du système dépend fortement de sa capacité à s'approvisionner en substrats à faible coût, qu'ils soient produits sur la ferme ou qu'ils proviennent de l'extérieur.

10 Références

- Askri, A., Laville, P., Trémier, A., Houot, S., 2016. Influence of Origin and Post-treatment on Greenhouse Gas Emissions After Anaerobic Digestate Application to Soil. *Waste and Biomass Valorization* 7, 293–306.
- Bacenetti, J., Fusi, A., Negri, M., Guidetti, R., Fiala, M., 2014. Environmental assessment of two different crop systems in terms of biomethane potential production. *Science of The Total Environment* 466–467, 1066–1077. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.109>
- Baldé, H., VanderZaag, A.C., Burt, S.D., Wagner-Riddle, C., Evans, L., Gordon, R., Desjardins, R.L., MacDonald, J.D., 2018. Ammonia emissions from liquid manure storages are affected by anaerobic digestion and solid-liquid separation. *Agricultural and Forest Meteorology* 258, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.036>
- Baral, K.R., Jégo, G., Amon, B., Bol, R., Chantigny, M.H., Olesen, J.E., Petersen, S.O., 2018. Greenhouse gas emissions during storage of manure and digestates: Key role of methane for prediction and mitigation. *Agricultural Systems* 166, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.009>
- Bareha, Y., Girault, R., Jimenez, J., Trémier, A., 2018. Characterization and prediction of organic nitrogen biodegradability during anaerobic digestion: A bioaccessibility approach. *Bioresour Technol* 263, 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.085>
- Béghin-Tanneau, R., Guérin, F., Guirese, M., Kleiber, D., Scheiner, J.D., 2019. Carbon sequestration in soil amended with anaerobic digested matter. *Soil and Tillage Research* 192, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.024>
- Berti, M., Johnson, B., Ripplinger, D., Gesch, R., Aponte, A., 2017. Environmental impact assessment of double- and relay-cropping with winter camelina in the northern Great Plains, USA. *Agricultural Systems* 156, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.012>
- Bézat, C., Quenu, H., Martin, G., 2016. Diversification des assolements : Définition. *Dictionnaire d'Agroécologie*.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudoin, N., 2008. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model, Editions Quae. ed.
- Brozyna, M.A., Petersen, S.O., Chirinda, N., Olesen, J.E., 2013. Effects of grass-clover management and cover crops on nitrogen cycling and nitrous oxide emissions in a stockless organic crop rotation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 181, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.013>
- Buchen-Tschiskale, C., Hagemann, U., Augustin, J., 2020. Soil incubation study showed biogas digestate to cause higher and more variable short-term N₂O and N₂ fluxes than mineral-N. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 183, 208–219. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900075>
- Burmeister, J., Walter, R., Fritz, M., 2014. Effets de la fertilisation des digestats issus de la méthanisation sur la faune du sol. *Biogas Forum Bayern N° I - 27/2015*, éd. ALB Bayern e.V.
- Chen, R., Blagodatskaya, E., Senbayram, M., Blagodatsky, S., Myachina, O., Dittert, K., Kuzyakov, Y., 2012. Decomposition of biogas residues in soil and their effects on microbial growth kinetics and enzyme activities. *Biomass and Bioenergy* 45, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.014>
- Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., Balesdent, J., 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research* 188, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Clivot, H., Mouny, J.-C., Duparque, A., Dinh, J.-L., Denoroy, P., Houot, S., Vertès, F., Trochard, R., Bouthier, A., Sagot, S., Mary, B., 2019. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software* 118, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>
- Duttmann, R., Schwanebeck, M., Nolde, M., Horn, R., 2014. Predicting Soil Compaction Risks Related to Field Traffic during Silage Maize Harvest. *Soil Science Society of America Journal* 78, 408–421. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.05.0198>

- Evans, L., VanderZaag, A.C., Sokolov, V., Baldé, H., MacDonald, D., Wagner-Riddle, C., Gordon, R., 2018. Ammonia emissions from the field application of liquid dairy manure after anaerobic digestion or mechanical separation in Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* 258, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.017>
- Feyereisen, G.W., Camargo, G.G.T., Baxter, R.E., Baker, J.M., Richard, T.L., 2013. Cellulosic Biofuel Potential of a Winter Rye Double Crop across the U.S. Corn–Soybean Belt. *Agronomy Journal* 105, 631–642. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0282>
- Graß, R., Heuser, F., Stülpnagel, R., Piepho, H.-P., Wachendorf, M., 2013. Energy crop production in double-cropping systems: Results from an experiment at seven sites. *European Journal of Agronomy* 51, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.004>
- Guilayn, F., Jimenez, J., Rouez, M., Crest, M., Patureau, D., 2019. Digestate mechanical separation: Efficiency profiles based on anaerobic digestion feedstock and equipment choice. *Bioresource Technology* 274, 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.090>
- Gunnarsson, A., Lindén, B., Gertsson, U., 2011. Biodigestion of Plant Material Can Improve Nitrogen Use Efficiency in a Red Beet Crop Sequence. *HortScience* 46, 765–775. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.5.765>
- Gutser, R., Ebertseder, Th., Weber, A., Schraml, M., Schmidhalter, U., 2005. Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 168, 439–446. <https://doi.org/10.1002/jpln.200520510>
- Hamelin, L., Naroznova, I., Wenzel, H., 2014. Environmental consequences of different carbon alternatives for increased manure-based biogas. *Applied Energy* 114, 774–782. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.033>
- Heggenstaller, A.H., Anex, R.P., Liebman, M., Sundberg, D.N., Gibson, L.R., 2008. Productivity and Nutrient Dynamics in Bioenergy Double-Cropping Systems. *Agronomy Journal* 100, 1740–1748. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0087>
- Hénault, C., Gossel, A., Mary, B., Roussel, M., Léonard, J., 2012. Nitrous Oxide Emission by Agricultural Soils: A Review of Spatial and Temporal Variability for Mitigation. *Pedosphere, Special Issue on Bioremediation of Contaminated Soil and Water* 22, 426–433. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60029-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60029-0)
- Hirschy, M., Ravier, C., Lorin, M., 2015. CRITER 5.4 - Un outil de caractérisation des performances de systèmes de culture.
- Igos, E., Golkowska, K., Koster, D., Vervisch, B., Benetto, E., 2016. Using rye as cover crop for bioenergy production: An environmental and economic assessment. *Biomass and Bioenergy* 95, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.09.023>
- Lantz, M., Börjesson, P., 2014. Greenhouse gas and energyassessment of the biogas from co-digestion injected into the natural gas grid: A Swedish case-study including effects on soil properties. *Renewable Energy* 71, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.048>
- Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chaussod, R., Guillotin, M.L., Linères, M., Mary, B., Metzger, L., Morvan, T., Tricaud, A., Villette, C., Houot, S., 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science* 60, 297–310. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01110.x>
- Levavasseur, F., Houot, S., 2019. Développement d'un outil d'évaluation multicritère des performances des systèmes de cultures utilisant des PRO, in: APIVALE 2019. Les Produits Résiduaire Organiques : Ingrédients Clés de La Bioéconomie Circulaire ? Presented at the APIVALE, Rennes, France.
- Levavasseur, F., Lashermes, G., Mary, B., Morvan, T., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Houot, S., 2021. Quantifying and simulating carbon and nitrogen mineralization from diverse exogenous organic matters. *Soil Use and Management* n/a. <https://doi.org/10.1111/sum.12745>
- Levavasseur, F., Mary, B., Christensen, B.T., Duparque, A., Ferchaud, F., Kätterer, T., Lagrange, H., Montenach, D., Resseguier, C., Houot, S., 2020. The simple AMG model accurately simulates

- organic carbon storage in soils after repeated application of exogenous organic matter. *Nutr Cycl Agroecosyst*. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10065-x>
- Levavasseur, Florent, Mary, B., Houot, S., 2021. C and N dynamics with repeated organic amendments can be simulated with the STICS model. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10106-5>
- Moinard, V., 2021. Conséquences de l'introduction de la méthanisation dans une exploitation de polyculture-élevage sur les cycles du carbone et de l'azote. Combinaison de l'expérimentation et de la modélisation à l'échelle de la ferme. Université Paris-Saclay.
- Möller, K., 2015. Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 1021–1041. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0284-3>
- Möller, K., Müller, T., 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Eng. Life Sci.* 12, 242–257. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>
- Möller, K., Stinner, W., 2009. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *European Journal of Agronomy* 30, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.06.003>
- Negri, M., Bacenetti, J., Brambilla, M., Manfredini, A., Cantore, A., Bocchi, S., 2014. Biomethane production from different crop systems of cereals in Northern Italy. *Biomass and Bioenergy* 63, 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.041>
- Nicholson, F., Bhogal, A., Cardenas, L., Chadwick, D., Misselbrook, T., Rollett, A., Taylor, M., Thorman, R., Williams, J., 2017. Nitrogen losses to the environment following food-based digestate and compost applications to agricultural land. *Environmental Pollution* 228, 504–516. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.05.023>
- Orzi, V., Riva, C., Scaglia, B., D'Imporzano, G., Tambone, F., Adani, F., 2018. Anaerobic digestion coupled with digestate injection reduced odour emissions from soil during manure distribution. *Science of The Total Environment* 621, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.249>
- Pacholski, A., Achim, S., Henning, K., Juergen, A., 2013. Ammonia emission after field application of biogas digestates: measurements in two energy crop rotations across 5 sites in Germany. RAMIRAN 2013. 15th International Conference, Versailles, France, 3-5 June. 2013. Proceedings.
- Prays, N., Franko, U., 2018. Long-Term Impact of Biogas Production on Soil Organic Carbon Storage. *JAES* 7. <https://doi.org/10.15640/jaes.v7n2a2>
- Riva, C., Orzi, V., Carozzi, M., Acutis, M., Boccasile, G., Lonati, S., Tambone, F., D'Imporzano, G., Adani, F., 2016. Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: Agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts. *Science of The Total Environment* 547, 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.156>
- Rollett, A.J., Bhogal, A., Scullion, J., Nicholson, F.A., Taylor, M.J., Williams, J.R., 2020. The effect of field application of food-based anaerobic digestate on earthworm populations. *Soil Use Manage.* 1–10. <https://doi.org/10.1111/sum.12615>
- Sadet-Bourgeteau, S., Maron, P.A., Ranjard, L., 2020. Que sait-on vraiment de l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles ? *Agronomie, Environnement & Sociétés* 10.
- Schittenhelm, S., 2010. Effect of Drought Stress on Yield and Quality of Maize/Sunflower and Maize/Sorghum Intercrops for Biogas Production. *Journal of Agronomy and Crop Science* 196, 253–261. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00418.x>
- Schwager, E.A., VanderZaag, A.C., Wagner-Riddle, C., Crolla, A., Kinsley, C., Gregorich, E., 2016. Field Nitrogen Losses Induced by Application Timing of Digestate from Dairy Manure Biogas Production. *Journal of Environmental Quality* 45, 1829–1837. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.04.0148>
- Sieling, K., Herrmann, A., Wienforth, B., Taube, F., Ohl, S., Hartung, E., Kage, H., 2013. Biogas cropping systems: Short term response of yield performance and N use efficiency to biogas residue

- application. *European Journal of Agronomy* 47, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.01.002>
- Sommer, S.G., Générumont, S., Cellier, P., Hutchings, N.J., Olesen, J.E., Morvan, T., 2003. Processes controlling ammonia emission from livestock slurry in the field. *European Journal of Agronomy* 19, 465–486. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00037-6)
- Stinner, P.W., 2015. The use of legumes as a biogas substrate - potentials for saving energy and reducing greenhouse gas emissions through symbiotic nitrogen fixation. *Energy, Sustainability and Society* 5, 4. <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0034-z>
- Styles, D., Gibbons, J., Williams, A.P., Dauber, J., Stichnothe, H., Urban, B., Chadwick, D.R., Jones, D.L., 2015. Consequential life cycle assessment of biogas, biofuel and biomass energy options within an arable crop rotation. *GCB Bioenergy* 7, 1305–1320. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12246>
- Szerencsits, M., Weinberger, C., Kuderna, M., Feichtinger, F., Erhart, E., Stephan Maier, 2016. Biogas from Cover Crops and Field Residues: Effects on Soil, Water, Climate and Ecological Footprint. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1126493>
- Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Møller, H.B., Sørensen, P., Christensen, B.T., 2013. Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. *Soil Biology and Biochemistry* 58, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.006>
- Van Soest, P.J., Wine, R.H., 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists* 50, 50–55.
- Verdi, L., Kuikman, P.J., Orlandini, S., Mancini, M., Napoli, M., Dalla Marta, A., 2019. Does the use of digestate to replace mineral fertilizers have less emissions of N₂O and NH₃? *Agricultural and Forest Meteorology* 269–270, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.004>
- Wannasek, L., Ortner, M., Kaul, H.-P., Amon, B., Amon, T., 2019. Double-cropping systems based on rye, maize and sorghum: Impact of variety and harvesting time on biomass and biogas yield. *European Journal of Agronomy* 110, 125934. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125934>
- Westerman, P.R., Heiermann, M., Pottberg, U., Rodemann, B., Gerowitt, B., 2012. Weed seed survival during mesophilic anaerobic digestion in biogas plants. *Weed Research* 52, 307–316. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2012.00927.x>
- Wolf, U., Fuß, R., Höppner, F., Flessa, H., 2014. Contribution of N₂O and NH₃ to total greenhouse gas emission from fertilization: results from a sandy soil fertilized with nitrate and biogas digestate with and without nitrification inhibitor. *Nutr Cycl Agroecosyst* 100, 121–134. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9631-z>

11 Annexes

Annexe 1 : Caractéristiques moyennes (et écart-type) des digestats de méthanisation étudiés et d'un lisier porcin et d'un fumier bovin moyen

Paramètres	Digestat brut (n=9)	Digestat liquide (n=2)	Digestat solide (n=2)	Lisier porcin*	Fumier bovin*
MS (% MB)	6.31 (1.29)	6.20 (3.25)	23.77 (6.51)	5	21.1
C total (% MB)	2.45 (0.43)	2.55 (1.00)	10.15 (1.77)	-	-
C organique (% MB)	2.10 (0.41)	1.81 (0.83)	8.85 (1.96)	1.7	8.3
N total (% MB)	0.50 (0.09)	0.56 (0.12)	0.52 (0.04)	0.45	0.57
N organique (% MB)	0.21 (0.04)	0.20 (0.05)	0.48 (0.04)	0.20	-
N ammoniacal (% MB)	0.30 (0.09)	0.35 (0.06)	0.04 (0.02)	0.25	0.05
N ammoniacal (% N total)	59 (9)	65 (3)	11 (3)	55	-
C org / N org	9.9 (1.2)	8.6 (1.6)	18.7 (2.5)	-	-
P ₂ O ₅ (% MB)	0.13 (0.06)	0.19 (0.17)	0.59 (0.01)	0.25	0.30
K ₂ O (% MB)	0.40 (0.07)	0.44 (0.07)	0.46 (0.12)	0.30	0.69

* Source : expertise collective MAFOR (Houot et al., 2014)

Annexe 2 : Résultats des simulations à la parcelle. Moyenne annuelle à l'échelle de la rotation (voir page suivante)

N°	Nom	Biomasse totale (t MS/ha/an)	Biomasse récoltée (t MS/ha/an)	Durée en sol nu (jours/an)	Diversité des familles cultivées	Diversité des périodes d'implantation	Stockage C à 30 ans(t C/ha)	Bilan P (kg P ₂ O ₅ /ha/an)	Bilan K (kg K ₂ O/ha/an)	IFT total
1	Base avant métha	17	9	81	2.2	5	0.0	-53	-64	5.75
2	Base avant métha sur sables	16	8	81	2.2	5	-0.2	-49	-61	5.75
3	Interculture non couverte avant métha	16	9	105	1.9	5	-1.2	-53	-64	5.75
4	ACS avant métha	18	9	27	2.6	5	1.6	-53	-64	5.75
5	Compost	17	9	81	2.2	5	7.2	-28	-34	5.75
6	Base après métha	19	12	57	1.7	5	2.3	-35	-15	6.08
7	Base après métha sur sables	18	12	57	1.7	5	2.2	-34	-18	6.08
8	Sécheresse estivale	19	12	57	1.7	5	2.3	-35	-15	6.08
9	Peu de CIVE	18	10	70	2.0	5	2.4	-30	1	5.87
10	Pois + CIVE été	18	11	69	2.0	4	1.5	-32	-8	5.91
11	Plus de CIVE hiver	20	12	49	1.2	4	4.0	-42	-17	5.94
12	CIVE bas intrant	17	10	57	1.7	5	1.6	-30	0	5.41
13	Irrigation maïs CIVE et grain	19	12	57	1.7	5	2.6	-38	-22	6.08
14	Récolte précoce CIVE hiver	19	11	57	1.7	5	2.1	-35	-13	6.08
15	Dédiées - double ensilage	19	12	57	1.7	5	1.7	-31	-10	5.79
16	Dédiées - maïs	18	11	69	1.8	5	1.4	-27	-1	5.555
17	Moins de digestat	19	12	57	1.7	5	1.3	-47	-47	6.08
18	Plus de digestat	19	12	57	1.7	5	2.9	-24	17	6.08
19	Digestat en 1er apport	19	12	57	1.7	5	2.3	-35	-15	6.08
20	Digestat avant CIPAN	18	10	70	2.0	5	2.4	-30	1	5.87
21	Digestat avant maïs CIVE	19	12	57	1.7	5	2.2	-35	-15	6.08
22	Séparation de phase	19	12	57	1.7	5	2.7	-40	-11	6.08
23	Fertilisation CIVE fixe	19	12	57	1.7	5	2.3	-35	-15	6.08

N°	Nom	Besoin engrais N (kg N/ha/an)	Besoin engrais N après 30 ans (kg N/ha/an)	Drainage (mm/an)	Lixiviation NO ₃ ⁻ (kg N/ha/an)	Volatilisation NH ₃ (kg N/ha/an)	Emissions N ₂ O (kg N/ha/an)	Bilan GES (kg CO ₂ eq/ha/an)
1	Base avant métha	175	172	142	2	19	2.4	1725
2	Base avant métha sur sables	153	154	202	14	11	1.0	1310
3	Interculture non couverte avant métha	164	170	157	6	18	2.5	1940
4	ACS avant métha	177	166	116	2	20	2.1	1257
5	Compost	166	124	142	3	18	2.5	95
6	Base après métha	118	109	122	2	22	2.5	977
7	Base après métha sur sables	101	92	196	12	16	1.1	552
8	Sécheresse estivale	122	114	49	1	24	2.2	897
9	Peu de CIVE	114	102	130	3	22	2.5	909
10	Pois + CIVE été	103	97	124	2	20	2.5	1053
11	Plus de CIVE hiver	128	110	120	3	23	2.6	717
12	CIVE bas intrant	119	109	125	3	22	2.5	1105
13	Irrigation maïs CIVE et grain	126	113	127	2	23	2.6	985
14	Récolte précoce CIVE hiver	115	105	125	3	22	2.5	988
15	Dédiées - double ensilage	115	109	122	2	22	2.4	1067
16	Dédiées - maïs	108	102	128	2	21	2.4	1091
17	Moins de digestat	140	135	123	2	22	2.4	1286
18	Plus de digestat	95	84	122	3	23	2.6	648
19	Digestat en 1er apport	119	110	126	2	19	2.4	954
20	Digestat avant CIPAN	115	104	131	3	22	2.6	927
21	Digestat avant maïs CIVE	125	114	121	3	24	2.7	1088
22	Séparation de phase	112	101	121	2	21	2.5	758
23	Fertilisation CIVE fixe	121	112	122	5	23	3.0	1141

